



TITLE:

コンクリート構造物健全性評価のための弾性波トモグラフィ手法に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

桃木, 昌平

CITATION:

桃木, 昌平. コンクリート構造物健全性評価のための弾性波トモグラフィ手法に関する研究. 京都大学, 2015, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2015-01-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r12892>

RIGHT:

コンクリート構造物健全性評価のための
弾性波トモグラフィ手法に関する研究

2014 年

桃木 昌平

コンクリート構造物健全性評価のための 弾性波トモグラフィ手法に関する研究

目 次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 非破壊検査法によるコンクリート構造物の健全性評価の現状	4
1.2.1 変状の評価	6
(1) 大きさ・位置の評価	6
(2) 発生・進展状況の評価	7
1.2.2 コンクリートの品質推定	8
1.2.3 鉄筋腐食度	9
1.3 本研究の目的	10
1.4 本論文の構成	11
第1章の参考文献	13
第2章 弾性波トモグラフィによる非破壊検査手法	17
2.1 はじめに	17
2.2 トモグラフィの概要	17
2.3 トモグラフィ手法の既往の研究	18
2.3.1 トモグラフィ手法の医療分野への適用	18
2.3.2 トモグラフィ手法の地盤工学分野への適用	18
2.4 弾性波トモグラフィ手法	20
2.4.1 弾性波トモグラフィ手法の概要	20
(1) 順解析手法	21
(2) 逆解析手法	22
2.4.2 地盤工学分野への弾性波トモグラフィ手法の適用	24
2.4.3 コンクリート構造物の健全性評価への弾性波トモグラフィ手法の適用	24
2.5 まとめ	29
第2章の参考文献	31
第3章 非制限波線追跡法を用いた弾性波トモグラフィ手法に関する研究	35
3.1 はじめに	35
3.2 弾性波トモグラフィ手法の実構造物への適用上の課題と非制限波線追跡法の提案	35
3.3 非制限波線追跡法を実装した弾性波トモグラフィ手法による健全性評価の現場検証	37
3.3.1 はじめに	37

3.3.2 現場検証の概要	37
3.3.3 補修内容	38
3.3.4 適用方法	40
3.3.5 適用結果と考察	43
(1) 受信点波形の分析による評価	43
(2) 弾性波トモグラフィ手法による評価	46
(3) 採取したコアによる評価	49
3.3.6 補修効果の定量評価へのアプローチ	51
(1) 複合材料の均質化モデリング	52
(2) 数値解析結果と考察	54
3.4 まとめ	55
第3章の参考文献	56
第4章 弾性波の周波数減衰特性を用いた減衰トモグラフィ手法に関する研究	58
4.1 はじめに	58
4.2 損傷程度と弾性波の振幅の減衰に関する基礎試験	60
4.2.1 試験概要	60
4.2.2 試験結果と考察	62
4.3 スペクトル減衰率による弾性波トモグラフィ手法の提案	63
4.4 減衰トモグラフィ手法の現場検証	64
4.4.1 現場検証の概要	64
4.4.2 計測内容	65
4.4.3 計測結果と考察	66
4.5 減衰トモグラフィ手法による PC 建造物の健全性評価への適用性検証	71
4.5.1 概要	71
4.5.2 数値解析によるシミュレーション	72
4.5.3 弾性波トモグラフィ手法によるグラウト充填率評価の検証結果と考察	74
4.5.4 伝播速度とスペクトル減衰率の統合指標を用いたグラウト充填率評価へのアプローチ	76
4.6 まとめ	77
第4章の参考文献	78
第5章 表面波を用いた一面配置型弾性波トモグラフィ手法に関する研究	81
5.1 はじめに	81
5.2 表面波を用いた一面配置型弾性波トモグラフィ手法の提案	81
5.2.1 使用する弾性波の種類	81
5.2.2 表面波位相速度のトモグラフィへの適用性	83
5.3 模擬欠陥試験体による提案手法の検証	85

5.3.1 試験体の概要と計測方法	85
5.3.2 検証結果と考察	88
5.4 一面配置型弾性波トモグラフィ手法の適用事例	90
5.4.1 背面側の劣化状況の評価へのアプローチ	90
5.4.2 断面修復工法の施工品質の評価へのアプローチ	92
5.5 まとめ	94
第5章の参考文献	95
第6章 打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法に関する研究	97
6.1 はじめに	97
6.2 弾性波トモグラフィ手法におけるセンサ設置数と走査線密度の関係	97
6.3 打撃発信点波形推定手法の提案	99
6.3.1 距離減衰モデル回帰分析による打撃発信点振幅の推定	101
6.3.2 最小位相推移関数による打撃発信点波形の推定	104
6.4 打撃発信点位置標定手法の提案	110
6.4.1 打撃発信点位置標定と弾性波速度分布同時推定手法	111
(1) 非制限波線追跡法を用いた打撃発信点位置標定	111
(2) 中継点設置による打撃位置標定分解能の向上	112
(3) 暫定打撃発信位置を用いたトモグラフィ解析による弾性波速度分布の修正	113
6.4.3 打撃発信点位置標定手法の検証	114
(1) 数値シミュレーションによる検証	114
(2) 模擬欠陥コンクリート試験体による検証	116
6.5 打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法の現場検証	118
6.5.1 検証概要	118
6.5.2 計測方法	119
6.5.3 検証結果と考察	120
6.6 走査線密度に応じた要素分割モデルの設計	123
6.6.1 Delaunay 三角形分割を適用した要素分割手法	123
6.6.2 異なる要素分割によるトモグラフィ解析結果の比較	124
(1) 試験概要	124
(2) 要素分割仕様およびトモグラフィ解析結果と考察	125
6.7 まとめ	127
第6章の参考文献	128
第7章 結論と今後の課題	130
7.1 結論	130
7.2 コンクリート構造物のシナリオデザインにおける弾性波トモグラフィ手法の活用	134

7.3 今後の課題 140

第7章の参考文献 141

謝辞

研究業績

第1章 序論

1.1 研究の背景

我が国では、近代的な社会資本が本格的に建設されたのは明治以降であり、その頃を中心であった鉄道の建設を皮切りに、港湾、堤防、道路、下水道などの社会資本が徐々に建設され、1960年代から1970年代の高度経済成長期に建設のピークを迎えた。1964年の東京オリンピックや1970年の大阪万博による特需もあり、東海道新幹線や東名高速道路といった大都市間的高速交通網も急速に整備されていった。

一方、建設された社会資本は、21世紀に入り表1.1-1に示すように徐々に高齢化を迎える。平成24年度国土交通白書によると、2012年3月時点の建設後50年以上経過する社会資本の割合は、道路橋、トンネル、河川管理施設、下水道管きょ、港湾岸壁については2～20%程度であるが、20年後にはその割合が半数以上になるなど、高齢化した社会資本の割合は加速度的に高くなる見込みである¹⁾。

表 1.1-1 建設後 50 年以上経過する社会資本の割合¹⁾

	平成 24 年 3 月	平成 34 年 3 月	平成 44 年 3 月
道路橋 (橋長 2m 以上)	約 16%	約 40%	約 65%
トンネル	約 18%	約 31%	約 47%
河川管理施設 (国管理の水門など)	約 24%	約 40%	約 62%
下水道管きょ	約 2%	約 7%	約 23%
港湾岸壁 (水深 4.5 m 以深)	約 7%	約 29%	約 56%

上記社会資本の中でも最も問題を抱えているのがコンクリート構造物である。高度経済成長期における社会資本の特需は、有能な技術者や良質な材料の不足による不適切な施工という問題も引き起こしていた。そのため1980年代初めには、単なる構造物の高齢化のみでは片付けられない塩害やアルカリシリカ反応などを含み耐久性に対する早期劣化が顕在化し²⁾、近年においてもコンクリート構造物の信頼性を揺るがす中性化または内在塩化物イオンによる塩害、あるいは施工や維持管理に起因する問題が相次いでいる。前者は1999年6月、および同年10月に、JR山陽新幹線の小倉ー博多間のトンネル内においてコンクリート塊の剥落³⁾の発覚、後者は2012年12月、中央自動車道笹子トンネルにおいて天井板が崩落し9名の尊い人命が犠牲となった事故⁴⁾が挙げられる。このように、高齢化に加え早期劣化（以下、これらを総称して本論文では老朽化と呼ぶ）や不適切な施工も顕在化してきたコンクリート構造物の適切な維持管理が、現代における重要な課題である。

社会資本の維持管理に関して、国土交通行政の目指す方向性を提示し、重点的に取り組む政策を網羅した『国土交通省政策集 2010』⁵⁾には、「予防保全の考え方を導入した適切な維持管理・更新により、ライフサイクルコストの削減を図るとともに、国民生活や社会経済に甚大な影響を与える施設の致命的な損傷を回避する」ことが明記されている。また、2012年7月には社会資本整備審議会・交通政策審議会の技術部会の下に社会資本メンテナンス戦略小委員会⁶⁾を設置し、今後の維持管理・更新のあり方について検討を進めると

もに、国土交通省を挙げて老朽化対策に取り組むための体制として、2013 年 1 月国土交通大臣を議長とする「社会資本の老朽化対策会議」を設置し⁷⁾、総合的・横断的に検討を進め、同年 3 月に老朽化対策の全体像が、スケジュールを明確にした工程表として取りまとめられた（図 1.1-1）⁸⁾。

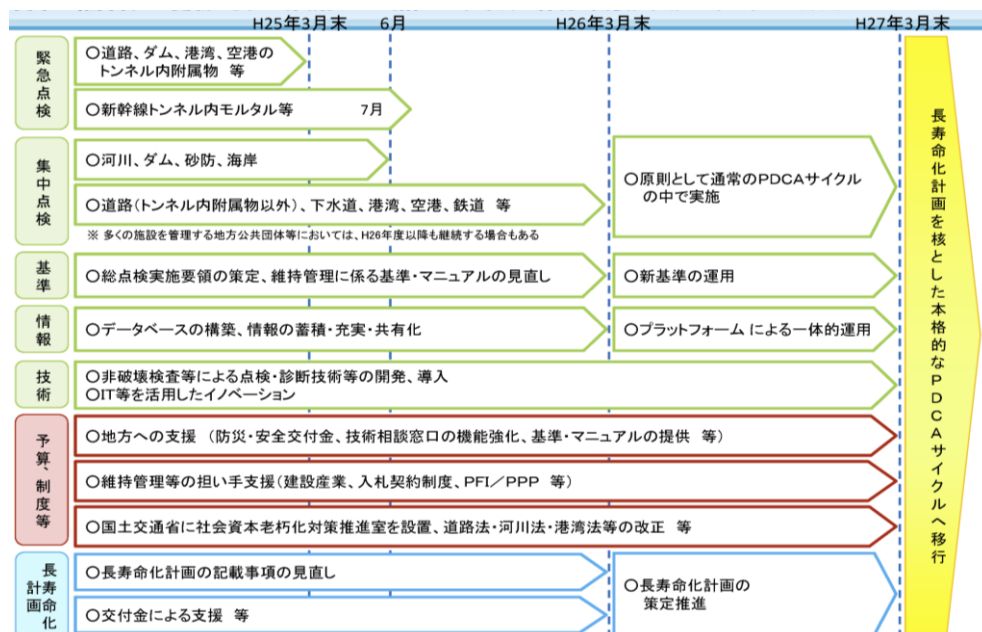


図 1.1-1 社会資本の維持管理・更新に関し当面講ずべき措置 工程表（全体像・概要）⁸⁾

これらの行動計画を遂行するにあたり、政策と技術の双方の面において解決すべき課題が残されている。政策面の課題としては、ライフサイクルコスト（LCC）が最小限となるような適切な維持管理計画の立案、およびその計画を実行するための技術者の育成と労働者の確保、技術面の課題としては、非破壊検査などによる点検・診断技術の開発、導入と IT などを活用したイノベーションが挙げられている⁸⁾。

政策面の課題を解決するためには、少子・高齢化に加え、昨今までの景気低迷による建設投資の削減に伴い、建設業従事者の減少に見舞われている現代に見合うような維持管理計画・アセットマネジメントを実現させる必要がある。アセットマネジメントは従来、預金、株式、債券などの個人の金融資産をリスク、収益性などを勘案して、適切に資産運用を図ることにより、その資産価値を最大化するためのマネジメントであった。この考え方が社会資本に取り入れられ、その運用、管理に必要な費用を最小限に抑え、質の高いサービスを提供することにより、資産価値を最大化するためのマネジメントとして、問題解決のための有効な考え方として着目されてきている⁹⁾。

構造物の維持管理計画においては、劣化予測の結果から構造物や部材の重要度、特異性を考慮してシナリオを設定する。シナリオの設定では劣化の予測が必要となり、精度の高い構造物の健全性（老朽化）の評価が求められる。構造物の社会的重要性を考えると、健全性の評価には、破壊することなく構造物の状況を把握する技術、いわゆる非破壊検査法が要求されており、これが技術面の課題となる。さらに、アセットマネジメントの観点から、トータル費用の最小化も重要な要求事項となり、評価精度のみならず健全性評価のさらなる効率化も技術面の課題として挙げられる。この効率化は工事費などの直接的費用の低減の他に、間接的費用の低減（例えば、構造物を供用したままでの対策が可能であること、補修・補強時間が極めて限定的

であることから、通行止めや構造物の使用停止が必要ないなど）も考慮する必要がある。

維持管理の対象となる社会資本（インフラ構造物）に着目すると、その多くはコンクリートが主材料として建設されている。そのため、コンクリート構造物への取り組みを優先する必要がある。コンクリートの劣化を大別すると化学的劣化と物理的劣化に分けることができる。前者は物質そのものが変化する形態の劣化であり、その要因としては、中性化、塩害、アルカリ骨材反応、化学的腐食などが挙げられる。特に中性化や塩害は鋼材（鉄筋など）の腐食に結びつく劣化である。後者は物質の状態が変化する形態の劣化であり、凍害、疲労、すりへりなどが挙げられる。つまり、これらの劣化機構と時間の作用によって構造物や部材の性能が低下するのが劣化である。特にコンクリート構造物は、多くが鉄筋コンクリートであり、主要部材である鉄筋の腐食とコンクリートの変状とを評価する必要があるが、その劣化メカニズムは異なることから、非破壊検査においてはそれぞれにおいて個別に評価せざるをえない。

コンクリート構造物の初期に現れる変状の一つとして、ひび割れが挙げられる。ひび割れが内部まで進展すると、コンクリート内部の鉄筋が腐食環境下にさらされ、鉄筋の腐食に起因する体積膨張により、コンクリート内部からさらにひび割れが発生する。一方、中性化や塩害を原因とする場合は、鉄筋腐食により発生する腐食ひび割れが内部から表面に向かって進行する。最終的にはコンクリート片の剥離・落下を引き起こし、さらに、鉄筋の腐食が広範囲に進展することで、構造物が保有する耐荷性能の低下を招くことにもつながる。鉄筋腐食については1.2で述べるように研究・実用化も進んでおり、コンクリートの劣化に注目してコンクリート表面から内部の変状をとらえることで劣化を適切に評価することが重要と考える。

さて、コンクリートの変状を確認する検査手法としては、表面から表層部に対応する方法と、深層・内部に対応する方法に大別される。前者の方法の中で、コンクリートの表面に現れるひび割れなどの状況を確認する簡便な方法が目視である。その目視と併用されることが多い“たたき”による方法（打音検査：土木学会コンクリート標準示方書 維持管理編）は、コンクリートの表面をハンマで打撃し、その衝撃の程度や音質を聞きわけることでコンクリート表面付近の劣化の有無を推定する方法である。簡便な方法でありながら劣化の有無を迅速に把握することができることから、目視と同様に豊富な実績を有している。

しかし、これらの方法にはいくつかの課題が存在する。目視および打音検査で得られる情報は、基本的にはコンクリート構造物の表面および表層部での変状に関するものに限られ、深層・内部や背面側の情報を得ることはできない。さらに、劣化の進行が初期で、軽微な段階での対応が重要なコンクリート構造物において、検査において評価した、「目に見える」「たいていわかる」変状が、初期で軽微な状況であるとは限らない。また、劣化の有無の評価を精度よく行うためには、担当する技術者に豊富な知識と経験の蓄積が必要とされる。つまり、点検結果の評価の標準化が難しく、検査者の主観に左右されることになる、また、検査結果を定量的に記録に残すことも困難であり、検査結果を次の検査に反映しにくいという課題もある。

一方、コンクリート表面から内部までの変状を評価する手法として、局所的な破壊をとまなう調査（コア採取による方法、ドリル削孔粉を用いる方法、“はつり”による方法など¹⁰⁾）がある。表面および表層のみならず深層・内部のコンクリート構造物の変状を評価するために必要な情報を精度よく得ることができる。近年では最小限の損傷に抑えるため、小径コア（直径 25 mm）や超小径コア（直径 10 mm）の採取による詳細調査方法の研究も進められているが^{11)~13)}、これらは「点」情報であり全体を示す情報ではないこと、一度破壊した箇所における経過観察や補修効果の確認は不可能となることなど限界がある。

以上のように、既往の方法では、表面から内部までを網羅的に検査・評価できない。したがって、コンク

リート構造物の健全性評価では、コンクリート表面から内部までの変状を全体的に評価できるとともに、検査者の能力や経験によらず継続的に評価できる、標準化が可能な非破壊検査法が必要である。

非破壊検査法は、検査対象構造物を壊すことなく内部の状況を把握できることから、構造物の健全性評価において極めて有効な手法である。目的や対象構造物によっては実用レベルまで達しているものもあり^{14)・16)}、コンクリート構造物の健全性評価においても様々な研究が行われている^{17)・19)}。しかし、上述したように、局所的な破壊をともなう調査であれば、表面から内部までを直接コアなどにより変状を確認でき、定量的な強度を把握することも可能である。しかし、従来の非破壊検査法の領域では、本研究で課題とするコンクリート表面から内部までの変状を定量的に、かつ低コストで省力化が図れる評価技術については十分確立しているとはいえない状況である²⁰⁾。そのため、コンクリート構造物の健全性評価に最適な非破壊検査法を確立し、社会資本の有効利用、継続利用、延命化に寄与させることが強く望まれている。

1.2 非破壊検査法によるコンクリート構造物の健全性評価の現状

非破壊検査法の歴史は古く、第一次世界大戦中にドイツがX線を用いて、複葉式飛行機の木製支柱、砲弾の葉きょうや輸送荷物の検査をしたのが最初であるといわれている²¹⁾。わが国では、1934年に三菱重工業(株)にドイツ製の据置式工業用X線装置が設置され、圧力容器、鉄道車両、航空機などの検査に使用されたのが初めてとされている²¹⁾。コンクリートに対する非破壊検査法としては、1948年にスイスのシュミットによって反発度法(リバウンドハンマでコンクリートの反発度を測定し、反発度と相関の高いコンクリートの圧縮強度を推定する方法)が考案され²²⁾、取り扱いが簡便であることなどの理由から1960年代前後から建設現場に利用されてきた¹⁰⁾。その後、様々な非破壊検査法に関する研究が行われている。手法別に見ると、弾性波を利用した、AE法(NDIS 2421, 2000 制定)・超音波法(NDIS 2426-1, 2009 制定)・衝撃弾性波法(NDIS 2426-2, 2009 制定)・打音法(NDIS 2426-3, 2009 制定)、電磁波を利用した、電磁誘導法(JCMS-III B5708, 2003 制定)・電磁波レーダ法(NDIS 3429, 2011 制定)、電気的な特性を測る自然電位法(ASTM C 876, 2009 制定)、赤外線サーモグラフィ法(NDIS 3428, 2009 制定)などがあり、その研究成果の一部は表 1.2-1～表 1.2-3 に示すような非破壊検査法として国内(日本非破壊検査協会(NDIS)、日本工業規格(JIS)、日本建材・住宅設備産業協会(JCMS))や国外(米国試験材料協会(ASTM))で基準化されるに至っている¹⁰⁾。さらに、各検査手法における課題解決や精度向上・利便性を目指して1.2.1～1.2.3 に詳述する研究が継続的に行われている。

コンクリート構造物の健全性評価に用いられる非破壊検査法の対象は、コンクリート構造物の初期欠陥、劣化、損傷などの変状の評価、コンクリート品質の推定、鉄筋腐食度、部材寸法や鉄筋の配筋状態の確認などに分けることができる。調査対象と一般的な非破壊検査技術との関係は、表 1.2-1～表 1.2-3 のように整理することができる。コンクリート構造物の維持管理計画において重要な評価の対象は表 1.2-1 に示す「変状」である。本節では、この変状を評価する非破壊検査法について既往の技術を概説する。なお、鉄筋コンクリート構造物の健全性評価においては、主要部材である鉄筋の腐食とコンクリートの変状とを個別に評価する必要がある。本研究においては、コンクリート表面から内部までの変状の評価を研究対象としているが、鉄筋の腐食も健全性評価において重要な要素であるため、鉄筋腐食度の評価に関する研究についても示す。

表 1.2-1 コンクリート構造物の変状を対象とした非破壊検査法の分類¹⁰⁾

変状の内容			対象位置	測定方法	評価	非破壊試験法
変状	初期欠陥	豆板	表面	目視で計測する	大きさ・位置	目視
			内部	電磁波の反射波形を確認する	大きさ・位置	電磁波レーダ法
				超音波の伝播速度と往復伝播時間を測定する	大きさ・位置	弾性波法（超音波法）
		初期ひび割れ・コールドジョイント	表面	目視または虫めがねで計測する	大きさ・位置	目視
			内部	超音波の波形を検出する	大きさ・位置	弾性波法（超音波法）
				衝撃弾性波の波形を検出する	大きさ・位置	弾性波法（衝撃弾性波法）
		浮き	表面	目視で観察する	大きさ・位置	目視
				ハンマで叩いた時の音を、①耳で判断する、②マイクロフォンで収録して波形を解析する	大きさ・位置	①たたき（打音検査）、②打音法
				金属球で擦った擦過音をロボットで測定する	大きさ・位置	ロボット打診法
				赤外線映像装置で表面温度分布を測定する	大きさ・位置	赤外線サーモグラフィ法
		脆弱部	内部	ハンマで叩いた時の音を耳で判断する	大きさ・位置	たたき（打音検査）
				超音波の伝播速度を測定する	大きさ・位置	弾性波法（超音波法）
				衝撃弾性波の伝播速度と往復伝播時間を測定する	大きさ・位置	弾性波法（衝撃弾性波法）
	品質の劣化	内部空洞	内部	放射線を透過して撮像する	大きさ・位置	放射線透過試験法
				電磁波の反射波形を確認する	大きさ・位置	電磁波レーダ法
				超音波の伝播速度と往復伝播時間を測定する	大きさ・位置	弾性波法（超音波法）
				衝撃弾性波の伝播速度と往復伝播時間を測定する	大きさ・位置	弾性波法（衝撃弾性波法[多重反射法]）
				縦弾性波の到達時間差を測定する	大きさ・位置	弾性波法（衝撃弾性波法[透過法]）
		グラウト充填性	内部	打撃で発生させた弾性波の多重反射スペクトルを検出する	大きさ・位置	弾性波法（衝撃弾性波法[多重反射法]）
				透過写真で確認する	大きさ・位置	放射線透過試験法
		ひび割れ（状況）	表面	目視または虫めがねで観察する	大きさ・位置	目視
			内部	放射線を透過して撮像する	大きさ・位置	放射線透過試験法
		（長さ）	表面	AE 装置を用いてひび割れの進展状況を計測する	発生・進展状況	AE 法
				目視またはメジャーで計測する	大きさ・位置	目視
		（幅）	表面	デジタル画像から抽出する	大きさ・位置	デジタルカメラ
				長さ変化を測定する	発生・進展状況	コンタクトゲージ法
	損傷	（深さ）	内部	目視またはメジャーで計測する	大きさ・位置	目視
				ひび割れ部と健全部の超音波の伝播時間差により推定する	大きさ・位置	弾性波法（超音波法）
		塩分量・分布	内部	超音波の波形を検出する	大きさ・位置	弾性波法（超音波法[直角回折波法]）
				衝撃弾性波の波形を検出する	大きさ・位置	弾性波法（衝撃弾性波法[位相反転法]）
		凍害劣化	内部	AE 波形の立上がり時間を測定する	発生・進展状況	AE 法
				鉄筋からの反射波の波形を比較する	大きさ・位置	電磁波レーダ法
		アルカリ骨材反応による劣化	表面	目視でコンクリートの浮き・ひび割れの状況を観察する	大きさ・位置	目視
			内部	超音波の伝播速度を測定する	大きさ・位置	弾性波法（超音波法）
		硫酸塩浸食劣化	表面	目視でコンクリートの劣化の状況を確認する	大きさ・位置	目視
			内部	AE 振幅分布を監視する	発生・進展状況	AE 法
		火害	表面	目視または写真で計測する	大きさ・位置	目視

表 1.2-2 コンクリート構造物のコンクリートを対象とした非破壊検査法の分類¹⁰⁾

構造体コンクリートの品質	圧縮強度	打撃してできたくぼみの大きさを測定する	表面硬度法
		表面の反発度を測定する	反発度法
		超音波の伝播速度を測定する	弾性波法（超音波法）
		衝撃弾性波の伝播速度を測定する	弾性波法（衝撃弾性波法）
	透気性	コンクリート表面に取り付けたチャンバー内の気圧変化に要する時間を測定する	シングルチャンバー法
			ダブルチャンバー法
	透水性	水頭圧を一定にして吸水量の時間的な変化を測定する	表面法

表 1.2-3 コンクリート構造物の鉄筋を対象とした非破壊検査法の分類¹⁰⁾

鉄筋	鉄筋腐食	状況	コンクリート表面の鉄筋の錆出やひび割れを観察する	目視
			自然電位を測定する	自然電位法
		腐食速度	放射線を透過して撮像する	放射線透過試験法
			電流を流して分極抵抗を測定する	分極抵抗法
	配筋状態	鉄筋位置	電磁波の反射波形から鉄筋位置を探索する	電磁波レーダ法
			透過写真で確認する	放射線透過試験法
		かぶり厚さ	誘導電流の変化によって鉄筋位置を探索する	電磁誘導法
			電磁波の伝播時間、コンクリートの比誘電率を計測する	電磁波レーダ法
			2 方向から撮像した透過写真から測定する	放射線透過試験法
			誘導電流の強さによってかぶり厚さを探索する	電磁誘導法

1.2.1 変状の評価

コンクリートの変状の評価は、「大きさ・位置」を評価するものと、「発生・進展状況」を評価するものに大別される。

(1) 大きさ・位置の評価

「大きさ・位置」の評価方法では、弾性波法が多く適用されてきた。この方法は、コンクリート表面にセンサを設置し、コンクリート表面に設置した発振子や衝撃入力装置（打撃含む）によってコンクリート内部に向かい弾性波を励起させ、これをセンサで計測し、弾性波の伝播速度などを評価指標としてコンクリートのひび割れ、剥離などの位置や範囲を評価する方法である。この方法は利用する周波数範囲、弾性波の与え方（励起方法）、受信方法、および検出方法によって超音波法、衝撃弾性波法、打音法の3つに分類される。

超音波法は、発振子により可聴域よりも高い20 kHz以上の超音波を励起させ、弾性波の到達時間、波形、周波数、位相などの変化から、ひび割れ深さや内部欠陥などを抽出する方法である²⁴⁾。この方法は測定物の形状や寸法の制約が無いという特長を有するが、鉄筋が存在すると精度が低下するという課題がある²³⁾。これに対し、平田・魚本はコンクリート表層部の鉄筋の影響を、受信波形データで識別しながらひび割れ深さを計測する方法を提案し、その精度を検証している²⁵⁾。

衝撃弾性波法は、コンクリート表面においてハンマなどの打撃により励起された弾性波をセンサで計測し、弾性波の速度、振幅、振動数特性などを指標としてひび割れ深さおよび範囲などを評価するものである。励起される弾性波の周波数は20 kHz以下であり、超音波法よりもエネルギーの減衰が少なく、比較的広範囲の検査が可能である。岩野らは、本手法をコンクリート構造物の厚さ測定に拡張している²⁶⁾。ただし、超音波法に比べて弾性波の波長が長いこと、測定分解能が劣るという課題がある²⁶⁾。

打音法は衝撃弾性波法と同じ原理で、音の違いにより健全部と欠陥部を区分するものである。弾性波の励起が容易であり、コンクリート表面にセンサを設置しないことからコンクリート表面の影響を受けにくいという特長がある²⁷⁾。ただし、欠陥部の判定に測定実施者の熟練度を要すること、点検結果の評価の標準化が困難なこと、点検結果を定量的に記録に残すことが困難なこと、周囲の騒音の影響を受けやすいこと、検出精度が高くないなどの課題がある²⁷⁾。

各方法とも課題はあるものの、弾性波法はコンクリートを伝播する様々な周波数帯域の弾性波を対象・用途に応じて利用することから、コンクリート構造物の表面・表層から深層・内部までの変状の評価が可能である。弾性波の評価指標の精査や、他の技術との組み合わせによって課題を解決できる可能性があり、コンクリート構造物の健全性評価に有望な方法であると考えられる。なお、「大きさ・位置」の評価方法としては、目視法が最も簡易な方法であるが、1.1で詳述しているので本項では省略する。

また、一般的には、アコースティック・エミッション（AE）法も弾性波法に含まれるが、図1.2-1に示すようにAE法の目的は変状の発生や進展状況の評価であるため、(2)で述べる。

評価位置をコンクリート表面・表層に限定すると、赤外線サーモグラフィ法や電磁波レーダ法が適用できる¹⁰⁾。赤外線サーモグラフィ法²⁸⁾は、コンクリート表面のひび割れなどの欠陥部と健全部との熱伝導率の違いによるコンクリート表面の温度差を赤外線サーモグラフィで測定し、得られた表面温度分布から健全性を評価するものである。コンクリート表面への加熱方法の違いにより、パッシブ検査法（日射など）、アクティブ検査法（強制加熱）に分類される。近年、赤外線サーモグラフィの性能が向上し、精度・分解能ともに大幅に向上するとともに、装置の小型化や低価格化が進むなど、実務に適用しやすい条件が整ってきている。

ただし、全てのコンクリート構造物や欠陥形態に適用するためには、測定対象物の特性や測定環境に最適な検出波長帯を持つ赤外線センサが必要となる。

電磁波レーダ法²⁹⁾は、コンクリート表面に向けて放射された電磁波がコンクリートと電気的性質の異なる物質、例えば鉄筋や空洞などとの境界面で反射され、再びコンクリート表面に出てくるまでの時間（送信から受信に到るまでの時間）から、反射物体までの距離を評価する方法である。センサなどをコンクリート表面に設置することなく調査可能であり、電磁波の到達範囲に限定すると高い精度で空洞や異物（コンクリートに対して）を検知することが可能である。ただし、コンクリート中の水分が多い場合は、コンクリートの誘電率が大きく（電磁波伝播速度が遅く）なるため、かぶりを大きく評価してしまうという課題、また、タイルやモルタル、ボード類の仕上げ材を介して探査する場合は、測定精度に大きな誤差が生じるという課題もある。

これら2つの方法は、上記のようにコンクリートの表面・表層に適用するものであり、コンクリート構造物の健全性評価には深層・内部までの変状の評価が可能な弾性波法が有望な方法であることが改めてわかる。

(2) 発生・進展状況の評価

発生・進展状況の評価には AE 法^{30),31)}が有効である。材料に荷重が作用した場合、材料の内部に蓄積されているひずみエネルギーが解放され、同時に材料に変形やひび割れが発生する。このとき、大部分のひずみエネルギーは、ひび割れ面の形成に、一部は音や熱などのエネルギーとして消費される。このときに発生する音（弾性波）が AE である。この AE を AE センサで検出し、信号処理を行うことで、材料の破壊の発生位置や進展状況の評価する方法が AE 法である。AE 法は外力を受けて励起される AE を受動的に検出する方法であり、常時または定期的なモニタリングにより破壊の進展状況を位置と併せてリアルタイムに検出することが可能である。

コンクリート内部で発生し、伝播してきた AE 波をコンクリート表面に設置した AE センサで受信し、コンクリート内部の劣化や損傷の把握^{32),34)}、微小ひび割れの発生位置、ひび割れの進展状況を把握することが可能である^{35), 36)}。また、進行する破壊の形態、プロセス、メカニズムなどの把握が視覚的に可能である³⁷⁾。このように AE の発生起因には、上述したような材料のひび割れの発生と進展にともなう一次起因の AE と、既存亀裂の擦れや開閉時に発生する二次起因の AE がある。Shiotani et al.は、既存の劣化や損傷に対し外力を与え、摩擦によって二次的に発生する AE を分析する手法をコンクリート杭の健全性調査に適用し、AE が有する種々のパラメータを利用して劣化・破損部と健全部とを分類することが可能であり、パラメータの中で継続時間、エネルギーによる劣化・破損部の特定精度が高いという結果を得ている³⁸⁾⁻⁴⁰⁾。また、同手法を列車荷重を外力にして橋梁下部工の耐震診断に適用し、ボアホールカメラによる損傷状況と比較することで精度を確認している^{41),42)}。さらに、湯山らは、供用中の橋梁床版で得られる AE エネルギー値を用いて、床版の損傷度を評価できる可能性を示し^{43), 44)}、吉見らは、繰返し載荷荷重と C_{alm} 比（損傷のある構造物では、載荷時に比べて除荷時にも AE が活発になる健全性の指標で、除荷過程での AE 発生総数／載荷と除荷過程での AE 発生総数で表される）から得られる勾配に着目することで床版の損傷が検討できる可能性を示している⁴⁵⁾。

近年では、ひび割れの発生と進展にともなう一次 AE、および既存損傷からの二次 AE を用いて、潜在する他の劣化や損傷の位置や規模を推定する、AE 法と弾性波トモグラフィ手法を組み合わせた AE トモグラフィ

が開発され、研究が進められている^{46)・49)}。

さらに、AE 法はコンクリート構造物だけでなく、地下に埋設された配管施設の漏水監視にも適用され、漏水有無の判断が AE 法により可能であるという報告もされている^{32), 50)}。

1.2.2 コンクリートの品質推定

コンクリートの品質とは、コンクリートの特性を定量化したもので、圧縮強度や透水性、透気性（緻密性）を指標に健全性の評価が行われている。ただし、圧縮強度は、非破壊検査法によって直接その指標を得ることはできない。品質を推定する方法として、反発度法、機械インピーダンス法、弾性波法、透気試験法などがある。

反発度法¹⁰⁾はリバウンドハンマでコンクリートの反発度を測定し、反発度と相関の高いコンクリートの圧縮強度を推定する方法である。測定が容易であるため、古くから広く用いられている。この方法では、コンクリート表面で測定された反発度と内部のコンクリート強度との間に相関関係があるとの仮定に基づいているが、反発度は強度以外にもコンクリートの中性化、表面含水率、材齢などの要因を受けることが知られているが、その補正法は確立されていない。そのため、測定値のばらつきが大きくなり、対象構造物ごとに 3 種類の強度の調合のコンクリート供試体を作成し、これらの反発度と圧縮強度を測定して関係式を求めることが原則とされ、これらの実施が不可能な場合は、既往の相関図表または関係式を用いることとなる。しかし、これらの関係は一律に規格化されておらず、一部構造物からコアを採取して、これの反発度と圧縮強度を測定し、適用する関係式を修正する必要がある。

機械インピーダンス法⁵¹⁾はコンクリート構造物の表面をハンマで打撃してコンクリート強度を推定する方法である。打撃によりコンクリートの縦弾性係数に由来する機械インピーダンスを測定し、その測定値から圧縮強度を推定する。久保ら⁵²⁾は打撃力波形を測定・解析することにより本手法の推定精度の向上を図っている。

弾性波法には、超音波伝播速度または衝撃弾性波伝播速度を用いる方法がある。前者は、測定端子から発振した超音波パルスがコンクリート中を透過し、対向する位置の測定端子に到達するまでの所要時間と端子間距離から伝播速度を求め、コンクリート強度を推定するものである。本手法は測定条件、配合、含水率、鉄筋量など多くの要因の影響を受けるため、反発度法などの他の強度推定法との複合で用いる方が結果の信頼性が向上すると言われている⁵³⁾。後者は、衝撃弾性波を発振させ、前者と同様の方法で、伝播速度を求める方法である。超音波と比べると衝撃弾性波のエネルギーは大きく、かつ調整可能であるため、これまで超音波では測定が難しかった長い距離間、伝播速度の極めて小さい部位での測定に有効である。ただし、配合・材齢の影響を受けるほか、表面の状態、含水率、ひび割れや内部空隙の有無、鉄筋量、配筋などの影響を受ける⁵³⁾。なお、超音波速度とコンクリートの品質は基本的に良好な相関関係があるため Whitehurst は、超音波伝播速度から定量的にコンクリート構造物の品質を評価する基準を提案している⁵⁴⁾。また、国内においても、非破壊試験による強度推定要領（案）（超音波試験（土研法）、衝撃弾性波法（iTECS 法）、衝撃弾性波法（表面 2 点法））が国土交通省より通知され、運用されている⁵⁵⁾。

透気試験法⁵⁶⁾はコンクリートの気体の通しやすさ（透気性）を測定し、コンクリートの表面の緻密性を評価する方法である。コンクリート表面にチャンバーを押し当て減圧し、圧力の回復速度を測定するシングルチャンバー法と、コンクリート内部と外部に 2 つのチャンバーを押し当て減圧し、内部チャンバーの回復速

度を測定するダブルチャンバー法がある。本手法においては、コンクリート含水率の影響を強く受け、含水率が高くなるほど透気係数が実際より小さく測定されるため、見かけ上緻密性が高く評価される課題がある。

ここで示した弾性波法を除く 3 つの試験法は、表面あるいは表層の強度や緻密性といったコンクリート品質の推定において有効な手法であるものの、適用範囲が限定されることから、これらの手法のみではコンクリート構造物の健全性評価は困難である。

1.2.3 鉄筋腐食度

鉄筋コンクリート構造物の耐久性能を低下させる要因の一つが、コンクリート中の鉄筋腐食である。鉄筋コンクリート構造物の維持管理においては、鉄筋腐食度を的確に評価することが重要である。それゆえ、鉄筋コンクリートの鉄筋腐食度を評価することを目的とした非破壊検査法に関する研究が行われ⁵⁷⁾、自然電位法⁵⁸⁾、分極抵抗法⁶⁰⁾、放射線透過試験法⁶¹⁾などが提案されている。

上記に提案されている検査法の中で、自然電位法と分極抵抗法は電気化学的手法である。コンクリート内部における鉄筋の腐食は、電気化学反応に基づいて進行するため、腐食状態の変化に伴い鉄筋の電位も変化することが知られている。自然電位法は、コンクリート表面で測定された鉄筋の自然電位によって鉄筋腐食度を推定するものである。この方法は、1950 年代にアメリカでコンクリート橋床版の腐食調査に初めて利用され 1977 年に ASTM 規格として標準化されている⁶²⁾。大気中にある鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋などの鋼材が腐食環境にあるかどうか、つまり調査時点での腐食の可能性を評価するものである。鉄筋コンクリート構造物が利用を開始してから内部鉄筋が腐食し、腐食によりかぶりコンクリートにひび割れが発生するまでの段階での診断に有効である⁵⁸⁾。しかし、コンクリート表面の電極と鉄筋表面間にあるかぶりコンクリートの性状（含水率、中性化、塩化物量）によって測定値は大きく影響を受けるため⁵⁹⁾、計測値をそのまま利用すると適切な腐食度判定ができないことがわかっており、かぶり部分の影響を定量的に補正する工夫が必要とされている¹⁰⁾。また、自然電位の測定位置はコンクリートの表面に設定するが、コンクリートと鉄筋との電氣的導通が必要であり、コンクリート表面が補修などにより絶縁材料によって覆われている構造物に対しては適用が困難である。

分極抵抗法は、電極反応速度論から、「腐食電流（腐食速度）は分極抵抗と呼ばれる腐食反応の抵抗と反比例の関係にある」ことを利用して、コンクリート表面に当てた電極から内部鉄筋へ微弱な電流を流したときの抵抗（分極抵抗）を測定して、鉄筋の腐食速度を推定する方法である⁶⁰⁾。そのため、腐食の可能性の他、連続測定を行うことでその時間積分値として腐食量の推定が可能である。自然電位法と同様に、鉄筋コンクリート構造物が利用を開始してから内部鉄筋が腐食し、腐食によりかぶりコンクリートにひび割れが発生するまでの段階の診断に有効である。絶縁材料で覆われた構造物中の鉄筋腐食度の評価も可能であるとの報告がある⁶³⁾が、一般的にはコンクリートもしくは鉄筋が絶縁体で覆われている場合は適用できない。また、分極抵抗法は、標準化や規格化されていないため、種々提案されている装置や手順によって測定精度や信頼性に大きなばらつきがあるとされている¹⁰⁾。

放射線透過試験法は人体に対するレントゲン検査に相当する方法で、コンクリート構造物中の鉄筋の位置や状況などを明らかにすることができる。ただし、一方から X 線を照射し、反対の面にフィルムなどを設置する必要があるため、両面に設置空間が必要であること、適用できる構造物の厚さの限界が 500 mm 程度であることが課題である。さらに、他の試験と異なり、放射線使用に対する安全管理が特別に必要となる。

さらに、鉄筋腐食の間接的な評価法として、中村らは、鉄筋腐食膨張圧の再現実験を行い、各損傷段階における赤外線サーモグラフィ測定を行うことにより、劣化の進行やかぶり・鉄筋径比の違いが赤外線画像に与える影響を検討している。また、その結果を用いて、赤外線サーモグラフィによる剥落予測モデルを構築する新しい試みを行っている⁶⁴⁾。このように、コンクリートの劣化に着目し、コンクリート表面から内部劣化を評価する研究が進められている。

1.3 本研究の目的

前節で示した通り、弾性波法はコンクリートを伝播する様々な周波数帯域の弾性波を対象・用途に応じて利用（超音波法であれば 20 kHz 以上、衝撃弾性波法であれば 20 kHz 以下の周波数帯域）することから、コンクリート構造物の表面・表層から深層・内部までの変状の評価が可能である。ただし、波長が長いと測定分解能は劣る。また、弾性波には縦波（P 波）、横波（S 波）、表面波といったモードの異なる波で固体中を伝播する波動であり、伝播速度が物質・振動モードによって異なるという特徴がある。なお、横波は、液体・気体中は振動しない。このように、弾性波法には、利用する周波数帯域によっては鉄筋の影響を強く受けたり、測定分解能が劣るなどの課題はあるものの、コンクリートの表面および表層のみならず、深層・内部の状況も定量的かつ客観的に評価ができる可能性のある非破壊検査法として、コンクリート構造物の健全性評価に有望な方法である。そのため、これらの課題を解決してコンクリート構造物の健全性評価に最適な方法を構築する必要がある。

例えば、塩谷らはコンクリート構造物の健全性評価に対する弾性波法の長所を活かしつつ、更なる高度化を目的にトモグラフィ解析を組み合わせた弾性波トモグラフィ手法を提案している⁶⁵⁾。弾性波は、弾性波速度構造により波線の回折・散乱が発生するため、コンクリート構造部の健全性評価のように、欠陥の存在が疑われる構造物への適用においては、波線経路を直線と見なす解析では評価が困難である。そこで、波線追跡法によって波線経路を探索・追跡する方法を提案した。この手法はコンクリート構造物の健全性評価において、更なる高精度化が可能で、面的な評価（可視化）、標準化も可能となる極めて有用な技術と考えられる。

しかし、コンクリート構造物の健全性評価の要求レベルは高まっており、弾性波トモグラフィ手法の実用化には解決すべき課題がある。詳細は次章に示すが、下記に概説する。

① 実構造物への適用（3次元空間への拡張）

弾性波トモグラフィ手法では、伝播経路の追跡に用いる波線追跡法は限定された形状である四角形の辺上にセンサを配置する必要があるため、かつ評価対象は2次元平面に限定されている。そのため、実構造物への適用のためには、3次元空間に拡張する必要がある。

② 健全性の評価精度の向上（新たな指標の導入）

前述のように弾性波トモグラフィ手法は、弾性波法で得られた評価指標の精度を向上させるとともに、結果を客観的かつ面的に表現することが可能である。そのため、弾性波トモグラフィ手法による健全性の評価精度は、弾性波法の評価指標に左右される。したがって、評価精度の向上を目的に、コンクリートの劣化などの変状に敏感な健全性評価指標の提案が求められる。

③ 適用範囲の拡大（センサ配置が片側表面に制限される構造物への適用）

従来の弾性波トモグラフィ手法では適用不可能なトンネル覆工コンクリートや地中構造物など、センサ配

置が片側表面に制限されるコンクリート構造物への適用範囲の拡大が求められる。

④ 計測の効率化

コンクリート構造物の健全性評価は道路や鉄道など供用中の構造物に対して行われる場合が多いため、センサ設置を含む調査時間に制約があり、計測時間の短縮が求められる。評価精度を保持したままで計測の効率化を図る必要がある。

本研究では上記の課題に対して下記の検討により問題の解決を実施する。

- ① 実構造物への適用の課題に対しては、有限要素法を応用し、任意の3次元形状に対応可能な非制限波線追跡法を提案する。同時に、実構造物への適用により提案手法の妥当性を検証する。
- ② 健全性の評価精度の向上の課題に対しては、評価指標に弾性波の振幅・エネルギーを用いた減衰トモグラフィ手法を提案し、実構造物への適用により妥当性を検証する。
- ③ 適用範囲の拡大の課題に対しては、センサ配置が片側表面に制限されるコンクリート構造物への適用に対して、深さ方向の情報を有する表面波を健全性評価指標に用いた一面配置弾性波トモグラフィ手法を提案し、模擬欠陥試験体への適用により妥当性を検証する。
- ④ 計測の効率化の課題に対しては打音検査を併用し、センサ数を増やすことなく解析精度の分解能を確保する打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法を提案する。さらに、提案手法を実構造物に適用し妥当性を検証する。

1.4 本論文の構成

本論文は序論と結論を含め7章から構成されている。第3章～第6章に前節で示した弾性波トモグラフィ手法の課題についての検討結果を示す。以下に、各章の内容を概説するとともに、図1.4-1に本論文の構成図を示す。

第1章 序論

第1章では、研究の背景と目的ならびに論文の構成を示す。

第2章 弾性波トモグラフィによる非破壊検査手法

第2章では、トモグラフィの概要を示した後に、トモグラフィ手法の歴史や様々な分野への適用に関する既往の研究について述べる。さらに、弾性波トモグラフィ手法の概要、地盤工学分野への適用に関する既往の研究、およびコンクリート構造物の健全性評価への適用に関する既往の研究を概説するとともに、弾性波トモグラフィ手法の課題とその解決方法について示す。

第3章 非制限波線追跡法を用いた弾性波トモグラフィ手法に関する研究

第3章では、「実構造物への適用」の課題を検討する。現状の弾性波トモグラフィ手法では、適用対象断面が2次元断面に限定されていたが、有限要素法を応用した任意の3次元形状に対応可能な波線追跡法を提案し、この課題を解決する。同時に、実構造物への適用結果から提案手法の有効性を実証する。

第4章 弾性波の周波数減衰特性を用いた減衰トモグラフィ手法に関する研究

第4章では、「健全性の評価精度の向上」の課題を検討する。ひび割れや空洞といった欠陥部が微細な場合にも健全性を高精度・高感度に評価できる指標として、従来使用されてきた弾性波伝播速度に代わり、弾性波の振幅の減衰特性に周波数依存性があることを考慮したスペクトル減衰率を用いる評価方法を考案し、減衰トモグラフィ手法として提案する。また、提案手法の有効性を実構造物への適用結果から実証する。

第5章 表面波を用いた一面配置型弾性波トモグラフィ手法に関する研究

第5章では、「適用範囲の拡大」の課題を検討する。トンネル覆工コンクリートや擁壁のように従来適用が困難であった片側一面にしかセンサが配置できないコンクリート構造物にも適用可能なように、深さ方向の情報を有する表面波に着目し、表面波の位相速度を評価指標とした一面配置型弾性波トモグラフィ手法を提案する。また実構造物への適用結果から本手法の有効性を実証する。

第6章 打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法に関する研究

第6章では、「計測の効率化」の課題を検討する。この課題に対しては、打音検査技術と発信波形推定手法を組み合わせることにより、配置センサ数を大幅に減らしても打音箇所を増加させることで、従来方式と同等以上の評価を可能とする打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法を提案する。打音箇所の増加はセンサの配置に比べはるかに効率的であり、調査時間の短縮を含む計測の大幅な効率化が達成される。本手法の有効性および効果を現場実験結果に基づき実証する。

第7章 結論

本研究の総括であり、各章の研究成果を要約するとともに、今後の課題について述べる。

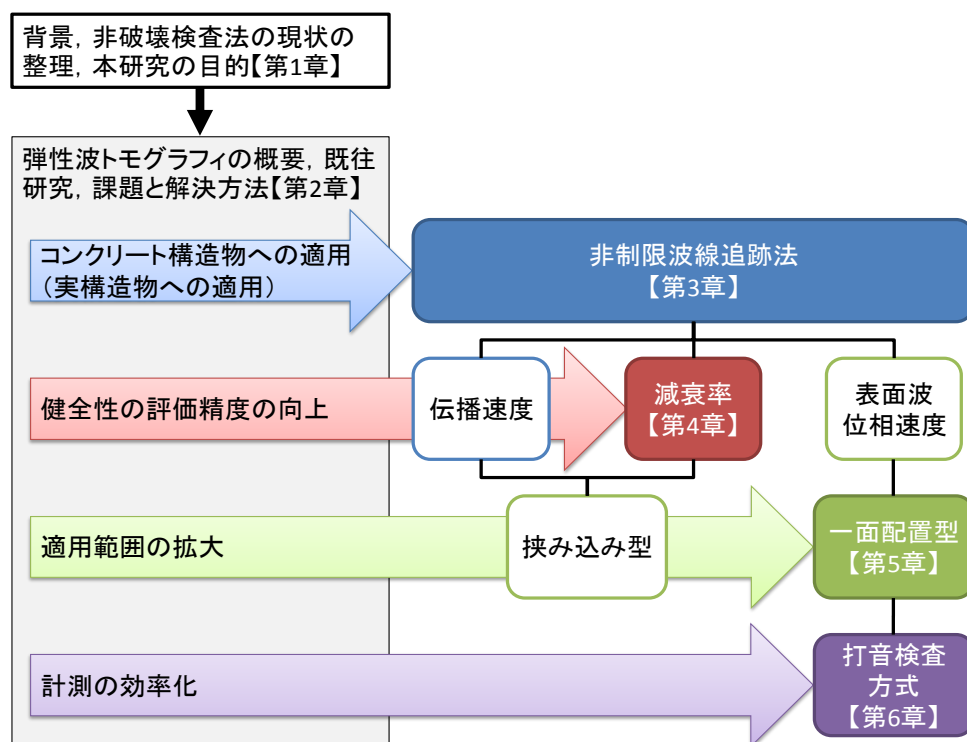


図 1.4-1 本論文の構成図

第1章の参考文献

- 1) 国土交通省：平成24年度国土交通白書，2013.
- 2) 川俣孝治：コンクリート構造物の電気化学的防食工法，Zairyo-to-Kankyo, Vol. 53, No. 9, pp. 426-430, 2004.
- 3) 山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会：山陽新幹線コンクリート構造物検討委員会報告書，2000.7.
- 4) 国土交通省：トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会，
<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/tunnel/index.html> (2014. 6. 22 閲覧)
- 5) 国土交通省：国土交通省政策集 2010，
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/point/sosei_point_tk_000006.html (2014. 6. 22 閲覧)
- 6) 国土交通省：社会資本整備審議会・交通政策審議会技術分科会，技術部会，社会資本メンテナンス戦略小委員会，
http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/s201_menntenansu01.html (2014. 6. 22 閲覧)
- 7) 国土交通省：社会資本の老朽化対策会議，
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/sosei_point_mn_000006.html (2014. 6. 22 閲覧)
- 8) 国土交通省：社会資本の維持管理・更新に関し当面講ずべき措置，
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/sosei_point_mn_000009.html (2014. 6. 22 閲覧)
- 9) 小澤一雅：社会資本におけるアセットマネジメントの導入，建設マネジメント技術，2006年9月号，pp. 7-11, 2006.
- 10) 社団法人日本非破壊検査協会：新コンクリートの非破壊試験，技報堂出版，pp. 9-11, 2010.
- 11) 若林信太郎，谷川恭雄，中込昭，佐原晴也，寺田謙一：小径コアによる構造体コンクリート強度の推定方法に関する研究，その2 構造体コンクリート強度推定式の設定，日本建築学会構造系論文集，第561号，pp. 9-16, 2002.
- 12) 平岩陸，谷川恭雄，遠藤大樹：小径コアによる構造体コンクリート強度推定に関する解析的研究，日本建築学会構造系論文集，第74巻，第644号，pp. 1699-1704, 2009.
- 13) 片平博，森濱和正，池永博威：コア試験体の小径化が圧縮強度に与える影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26, No. 1, pp. 399-404, 2004.
- 14) 鎌田敏郎：コンクリート構造物の非破壊検査技術 —弾性波—によるコンクリート下水道管の劣化診断手法—，土木学会誌，Vol. 98, No. 11, pp. 20-21, 2013.
- 15) 在原将之：電磁誘導法によるコンクリート中の鉄筋位置の測定方法，JASS5T-608，建材試験情報，Vo. 45, 2009.
- 16) 一般財団法人日本高圧力技術協会：AE法による地下貯蔵タンクの腐食損傷度の評価に係る技術指針，2012.
- 17) 宮川豊章，岩永巧，中込秀樹，葛目和宏：コンクリート構造物への非破壊検査の適用例 —コンクリート道路橋の鋼材調査—，コンクリート工学，Vol. 27, No. 3, pp. 84-88, 1989.
- 18) 西尾壮平，上田洋：コンクリート表面品質の簡易な非破壊評価手法の開発，鉄道総研報告，Vol. 28, No.

- 2, pp. 5-10, 2014.
- 19) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術委員会：報告書, p. 92, 2014.
- 20) 塩谷智基：弾性波法によるコンクリート構造物の健全性調査, 土木学会誌, Vol. 95, No. 12, pp. 32-35, 2010.
- 21) 加藤光昭：非破壊検査のおはなし, 日本規格協会, 1995.
- 22) Schmidt, E.: A Non-destructive Concrete Tester, Concrete, Vol. 59, No. 8, pp. 34-35, 1951.
- 23) 宮川豊章：コンクリート構造物にとっての非破壊検査, セメント・コンクリート, 第 756 号, pp. 12-17, 2010.
- 24) 山口哲夫, 丸茂文夫, 山口達夫, 岡村憲一：超音波の直接回折法による鉄筋コンクリートのひび割れ深さの測定, 非破壊検査, Vol. 45, No. 10, pp. 742-748, 1996.
- 25) 平田隆祥, 魚本健人：超音波法によるコンクリートのひび割れ深さ測定精度の向上, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 1, pp. 355-360, 2000.
- 26) 岩野聡史, 極壇邦夫, 境友昭, 森濱和正：衝撃弾性波によるコンクリート構造物の厚さ測定, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 1, pp. 547-552, 2001.
- 27) 三好茜, 園田佳巨, 川端健太：打音特性を用いた劣化診断に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 2131-2136, 2009.
- 28) 阪上隆英：赤外線サーモグラフィによる構造物の非破壊検査, 溶接学会誌, 第 Vol. 72, No. 4, pp. 251-255, 2003.
- 29) 吉村明彦：鉄筋位置測定のための非破壊試験（電磁波法）, 非破壊検査, Vol. 47, No. 10, pp. 712-716, 1980.
- 30) 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版, 112 p., 1988.
- 31) 塩谷智基：地盤内破壊評価法へのアコースティック・エミッションの適用に関する研究, 熊本大学博士論文, 266 p., 1998.
- 32) 鈴木哲也：アコースティック・エミッション法に基づくライフライン構造物の漏洩・損傷度評価法の確立に関する研究, 熊本大学学位論文, 176 p., 2006.
- 33) 鈴木哲也, 池田幸史, 米野現樹, 大津政康：データベース構築に基づく AE レートプロセス解析によるコンクリートの定量的損傷度評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, pp. 1791-1796, 2004.
- 34) 野口翔, 磯田敏郎, 後藤尚貴, 大津政康：凍結融解劣化コンクリートの弾性波法による損傷度評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, pp. 897-902, 2008.
- 35) 大津政康, 重石光弘, 湯山茂徳, 岡本享久：AE モーメントテンソルのための SiGMA コードの開発, 非破壊検査協会, Vol. 42, No. 10, pp. 570-575, 1993.
- 36) 大津政康, 塩谷智基：建築・土木分野への応用ーコンクリートと岩盤の AE, 非破壊検査, Vol. 49, No. 10, pp. 679-682, 2000.
- 37) M. Ohtsu and M. Shigeishi: Virtual Reality Presentation of Moment Tensor Analysis by SiGMA, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 23, No. 3, pp. 189-198, 2003.
- 38) Shiotani, T., N. Sakaino, M. Ohtsu and M. Shigeishi: Acoustic Emission Diagnosis of Concrete-Piles Damaged by Earthquakes, Acoustic Emission Group, Journal of Acoustic Emission, Vol. 15, No. 1-4, pp. 40-49, 1998.

- 39) Shiotani, T., M. Shigeishi and M. Ohtsu: Acoustic Emission Characteristics of Concrete-Piles, Elsevier Science, Construction and Buildings Materials Vol. 13, pp. 73-85, 1999.
- 40) 塩谷智基, 重石光弘, 大津政康: プレストレストコンクリート杭のアコースティック・エミッションによる損傷評価, 土木学会論文集, No. 655, V-48, pp. 133-141, 2000.
- 41) 羅休, 羽矢洋, 稲葉智明, 塩谷智基, 中西康博: AE 法による橋梁下部工の震害調査の研究, 土木学会地震工学論文集, Vol. 27, No. 198, CD-ROM, 2003.
- 42) 羽矢洋, 羅休, 稲葉智明, 塩谷智基, 中西康博: 鉄道橋梁下部工の損傷調査における 2 次 AE 法の適用性に関する検証, 第 59 回土木学会年次学術講演会講演概要集, CD-ROM, pp. 173-174, 2004.
- 43) 湯山茂徳, 李正旺, 吉沢勝, 魚本健人: AE 法による鉄筋コンクリート床版の疲労劣化評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 1, pp. 167-172, 1998.
- 44) 湯山茂徳, 李正旺, 友清剛, 吉沢勝, 魚本健人: AE 法による鉄筋コンクリート床版の疲労損傷評価, 土木学会論文集, No. 627/V-44, pp. 251-259, 1998.
- 45) 吉見晋平, 塩谷智基, 桃木昌平, 蔡華堅, 鎌田敏郎: AE 法による床版疲労破壊モニタリング, 第 17 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp. 65-68, 2009.
- 46) 桃木昌平, 小林義和, 塩谷智基: インフラアセットモニタリングのための AE トモグラフィの開発, ～その 1 アルゴリズム構築～, 第 19 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp. 57-60, 2013.
- 47) 大澤智, 塩谷智基, 桃木昌平, 小林義和: インフラアセットモニタリングのための AE トモグラフィの開発, ～その 2 交通荷重 AE の適用～, 第 19 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp. 61-64, 2013.
- 48) 塩谷智基, 奥出信博, 桃木昌平, 小林義和: 繊維補強コンクリートの曲げ試験における AE トモグラフィの解析, 第 19 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp. 65-68, 2013.
- 49) 桃木昌平, 塩谷智基, 小林義和, 水谷麻紀子: 打音検査を利用する弾性波トモグラフィ計測技術の開発, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集, 第 14 巻, 2014 (投稿中) .
- 50) 鈴木哲也, 大野健太郎, 大津政康: 漏水現象の AE モニタリングによる配管施設の危険度評価, 農業土木学会誌, Vol. 73, No. 11, pp. 993-996, 2005.
- 51) 近藤博, 島崎洋治, 笠井哲郎, 極壇邦夫: 機械インピーダンス法によるコンクリートの強度推定に関する基礎研究, 東海大学紀要工学部, Vol. 36, No. 2, pp. 133-137, 1996.
- 52) 久保元樹, 境友昭, 岡田包儀, 五味慎太郎, 荒川潤: 機械インピーダンス法による水路コンクリート構造物の強度推定, 農業農村工学会全国大会講演要旨集, pp. 430-431, 2008.
- 53) 谷川恭雄: コンクリート構造物の非破壊検査・診断方法, セメントジャーナル社, pp. 42-43, 2006.
- 54) E. A. Whitehurst: Evaluation of concrete properties from sonic tests, ACI Monograph No. 2, ACI, 1966.
- 55) 独立行政法人 土木研究所: 微破壊・非破壊試験による新設の構造物コンクリート強度測定要領 (案) (H22), <http://www.pwri.go.jp/jpn/seika/conc-kyoudo/conc-kyoudo.html> (2014. 9. 2 閲覧)
- 56) 下澤和幸, 永山勝, 今本啓一, 山崎順二, 二村誠二: かぶりコンクリートの耐久性能評価に関する簡易試験法の開発, コンクリート構造物への非破壊検査の展開シンポジウム論文集, pp. 291-296, 2006.
- 57) 宮川豊章, 井上晋, 小林和夫, 藤井学: コンクリート中の鋼材腐食の非破壊測定手法と劣化診断について

て，コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集，pp. 85-90，1988.

- 58) 鎌田敏郎，内田慎哉：コンクリート構造物の診断における非破壊検査の適用の現状と今後の展望，物理探査，Vol. 60，No. 3，pp. 253-262，2007.
- 59) 高木猛志，中川元宏，服部篤史，宮川豊章：中性化による鉄筋腐食への電気化学的非破壊検査の適用性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 25，No. 1，pp. 1655-1660，2003.
- 60) 小林孝一，宮川豊章：分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究，土木学会論文集，No. 669/V-50，pp. 173-186，2001.
- 61) 吉田幸司，鳥取誠一，手島和範：散乱X線法によるコンクリート内部欠陥探査の可能性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24，No. 1，pp. 1623-1628，2002.
- 62) ASTM C876-80: Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete
- 63) 足立幸郎，宮川豊章，関惟忠，小林茂広：自然電位・分極抵抗法による鉄筋腐食現地追跡調査，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17，No. 1，pp. 1243-1248，1995.
- 64) 中村繁貴，高谷哲，前田良文，山本貴士，宮川豊章：赤外線サーモグラフィによるかぶりコンクリートはく落予測手法，土木学会論文集 E2，Vol. 69，No. 4，pp. 450-461，2013.
- 65) 塩谷智基，羅休，羽矢洋：コンクリート構造物の非破壊検査手法における損傷認定と補修効果，電力土木，No. 322，pp. 79-84，2006.

第2章 弾性波トモグラフィによる非破壊検査手法

2.1 はじめに

本章では、トモグラフィの概要を示した後に、トモグラフィ手法の歴史や医療分野および地盤工学分野への適用に関する既往の研究について述べる。また、弾性波トモグラフィ手法の概要、地盤工学分野への適用に関する既往の研究、ならびに、コンクリート構造物の健全性評価への適用に関する既往の研究について述べる。さらに、弾性波トモグラフィをコンクリート構造物健全性評価に適用する場合に解決すべき課題およびその解決方法について記述する。

2.2 トモグラフィの概要

コンピュータで画像を扱う、いわゆるコンピュータグラフィクスでは、対象となる領域を要素の集合（要素分割モデル）として表現し、要素は節点で構成される。二次元の画像を表現する三角形や四角形などの要素はピクセル、三次元のデータ可視化に用いる四面体や六面体などの要素はボクセルともいわれ、各要素が持つ色情報によって画像が表示される¹⁾。トモグラフィ（Tomography）とは、さまざまな方向から対象物に光や電波などを当てて、透過情報や散乱情報を基に、各要素の物理量を導き出して色情報として画像にする方法²⁾のことで、断層撮影法³⁾などとも呼ばれる。

トモグラフィの基本構成を図 2.2-1 に示す。トモグラフィは大きく 2 つの解析から構成される⁴⁾。1 つは光や電波などの発信点から受信点に至る波線経路の透過情報や散乱情報を、要素分割モデルに与えた観測方程式（例えば、要素の物理量と要素を横切る波線長の関数）に基づき理論的に求めることで、この過程を順解析と呼ぶ。もう 1 つは、順解析によって求められた理論値と実際に観測された値との残差が最小となるように各要素の物理量を求めることで、この過程を逆解析と呼ぶ。

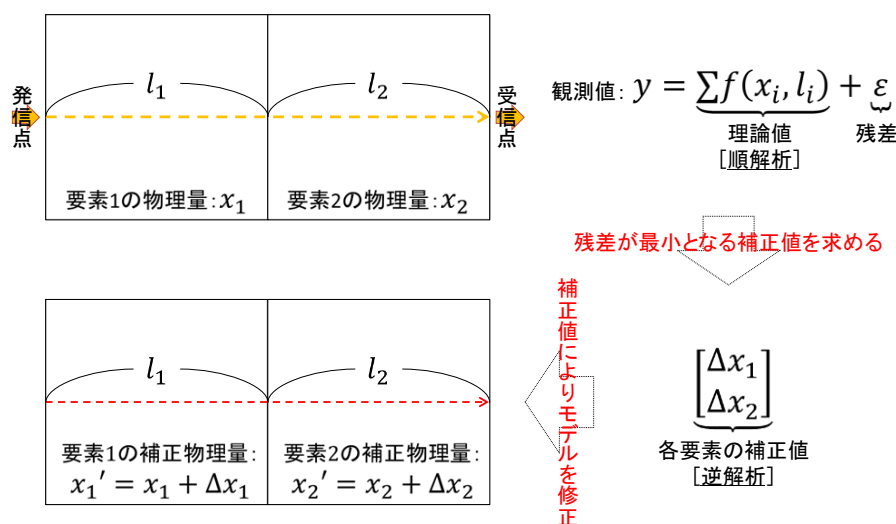


図 2.2-1 トモグラフィ基本構成

1 本の波線で得られる情報は波線経路における平均的な情報であり、仮にその情報が他の情報に比べ異常な値を示したとしても、それが波線経路上のどの位置を反映する情報かを判別することはできない。しかし、さまざまな方向の情報を基に、図 2.2-1 に示すトモグラフィの基本構成からなる順解析と逆解析を行うこと

で、対象となる領域が要素分割モデルにおいて、各要素の物理量を用いたパッチ画像やコンター画像によって表現され、異常値を反映する位置や規模を包括的かつ視覚的にわかりやすく把握できる。

トモグラフィは医療分野では X 線 CT³⁾、地盤工学分野では物理探査⁵⁾など、さまざまな分野の非破壊検査手法に应用されている。

2.3 トモグラフィ手法の既往の研究

本節では、トモグラフィ手法の歴史や医療分野および地盤工学分野への適用に関する既往の研究について述べる。なお、本研究の対象とする弾性波トモグラフィ手法に関する研究については、次節に別途記載する。

2.3.1 トモグラフィ手法の医療分野への適用

トモグラフィ手法は、医療分野における X 線 CT (Computed Tomography) の研究から始まっている³⁾。トモグラフィ手法の理論的考察と数学的解析は 1917 年に Radon によって提案され⁶⁾、この理論を応用した X 線 CT の理論が 1963 年 Cormack により提案された^{7),8)}。その後 1972 年に、Hounsfield G. N. によって、X 線 CT 理論を用いた装置が実際に開発された⁹⁾。

X 線 CT は、被写体に X 線を照射し、透過した X 線の線吸収係数の分布を求め画像化するもので、主に体の内部を可視化し、病変を検出することを目的としている。検査対象領域の周囲を線源となる X 線発生器と検出器が回転することで、全方位の X 線撮影が可能となる。照射された X 線は検査対象を通過し、対象に一部吸収されて減衰した後、線源の反対側に位置する検出器に記録される。得られた方向別の吸収量からフーリエ変換で画像として再構成するものである³⁾。当初は取得できるものは横断面画像のみであったが、1990 年代になると、X 線発生器と検出器をらせん状に回転することにより、3 次的に画像を得ることが可能となった³⁾。

また、X 線 CT と類似の技術である、磁気共鳴を利用した核磁気共鳴画像法 (MRI) が 1970 年代から研究が始まり¹⁰⁾、1980 年代には実用化に至っている¹¹⁾。この方法は、外部から磁場を掛けて、これに共鳴した体内の水素原子核から発生する磁場を検出し信号を得て画像化するものである。X 線 CT に比べ、放射線を使用しないので放射線被曝がない、病変と正常組織のコントラストが高いなどの特長を有しているものの、測定時間が長い、骨や肺の性状がわかりにくいなどの短所も有しており、目的に応じて X 線 CT と MRI を使い分けている¹¹⁾。

医療分野においてトモグラフィ手法が適用されたことで、患者に切開手術などを強いることなく、体内の状態の可視化が実現されている。本手法は、検査対象の規模、測定環境、測定条件などが大きく異なり、コンクリート構造物の健全性評価にそのまま応用することは困難であるが、破壊することなく内部の状態を評価する目的に対し、あらゆる部位への対応、迅速な測定、詳細かつ正確な評価など、コンクリート構造物の健全性評価において期待される特長を有するものである。

2.3.2 トモグラフィ手法の地盤工学分野への適用

医療分野で発展してきたトモグラフィ手法は、地盤の地質構造の調査など、地盤工学分野に应用されている。医療分野に比べ大規模な構造推定に利用されており、地下地盤の空洞の検出や火山噴火活動前後の火山体内部の密度推定、さらには、マントルなど地球内部構造の推定に用いられている¹²⁾⁻¹⁷⁾。

トモグラフィ手法が地盤工学分野へ最初に応用されたのは、地震波を利用して地球内部構造を推定する地

震波トモグラフィである¹²⁾。地震波トモグラフィは、表面波の分散性に着目し、理論波形と観測波形を比較する波形インバージョン法¹⁸⁾により地球内部の不均質構造を求めるもので、1980年代から広く利用されている¹²⁾。表面波は周期が長いほど波長が長くなり、深い地盤構造の影響を受ける。また、表面波の位相速度は波の周期によって異なる。これを表面波の分散性といい、この特性を利用して地盤内部の構造を推定する^{12),13)}。

地震波トモグラフィは、数 km から数十 km の大規模な地盤あるいは地球内部の構造推定を対象としている¹²⁾⁻¹⁴⁾。地震波トモグラフィでは、まず、観測された地震波の表面波記録から、周波数ごとの位相速度分布を求める。次に、この位相速度分布から周波数に対する位相速度分散曲線を求め、地盤の S 波速度構造を推定する¹⁴⁾。

この地震波トモグラフィは、広範な検査対象範囲に対し、地盤表面に設置された地震計を用いて地盤あるいは地球内部の構造推定を行うことが可能である。トンネル覆工コンクリートや擁壁など、挟み込むようにセンサを配置することができないコンクリート構造物へのトモグラフィ手法の適用に対し、地震波トモグラフィは大いに参考にすべき手法である。

また、地震波トモグラフィに比べ対象範囲が数百 m から数 km と狭い、ミューオグラフィ¹⁵⁾がある。ミューオグラフィは入力信号として、宇宙から降り注ぐ宇宙線に含まれる素粒子であるミュー粒子¹⁶⁾を利用する。ミュー粒子は、大気中であまり減衰しないで地表まで到達する素粒子で、高いエネルギーを持っており、振動や電気ノイズに影響を受けず地盤内を透過する。また、この検出は陽子や中性子などの粒子に比べ比較的容易であることから、この検出数を用いて地盤などの探査を行う試みがなされている¹⁷⁾。ミュー粒子は物質中においても、屈折や反射することなく、直進して透過する。また、ミュー粒子の検出数は透過する物質の密度に依存し、密度が高いほど透過数は減少する。この性質を利用し、指向性を持たせた検出装置を地下に設置し、検出装置の方向別のミュー粒子検出数から、地表と装置までの地盤内の空洞などの検出に適用されている¹⁷⁾。この検出を複数点において実施し、検出点の交わる断面において密度構造を推定するものがミューオグラフィである。ミューオグラフィは火山体の噴火前後の密度推定に利用されている¹⁵⁾。

ミューオグラフィはその測定原理から、大規模な物体の構造推定が可能である。しかも検出器が設置されれば、測定は受動的に行うことが可能であるという点は、他のトモグラフィ手法にはない特長を有する。しかし、測定に多くの時間が必要である。例えば、文献 15) の例では 1 週間から 1 か月の時間を要しており、構造物の点検・検査への応用においては課題がある。

さらに対象範囲を絞り込んだトモグラフィ手法として比抵抗トモグラフィや音響トモグラフィがある。

比抵抗トモグラフィとは、地表およびボーリング孔を利用して、対象とする領域を取り囲むように金属製の電極を配置し、その電極から人為的に電流を通电したときに発生する電位分布から、対象領域の比抵抗分布を求めるもので、得られた比抵抗分布から地盤構造を推定することを目的に実施されている^{19),20)}。1980 年代後半から利用され始めた比抵抗トモグラフィは、当初、数値計算を主とした理論研究がなされていた^{19),20)}。その後、比抵抗トモグラフィを用いた岩盤調査^{21),22)}、グラウチング注入範囲の調査^{23),24)}、ダムサイトの基礎地盤調査²⁵⁾など、適用が増えていった。さらに、比抵抗トモグラフィの測定において障害となっていたボーリング中の金属ケーシングを、線電流として活用する手法も開発され、比抵抗トモグラフィの活用が進んだ²⁶⁾。

比抵抗トモグラフィの測定においては、大量のデータを取得する必要があることから、全自動式の測定機器の開発や実用化も進んでいる。例えば鈴木らは、短期間の比抵抗モニタリングを効率的に行うため、512

成分比抵抗法自動測定装置を開発²⁷⁾している。

比抵抗トモグラフィにおいては、得られる結果と物性値との相関性が、課題に挙げられる。Archie による室内実験²⁸⁾、岩石の空隙率と比抵抗値との相関²⁹⁾、一軸圧縮強さや弾性係数などの力学的性質と比抵抗値との相関³⁰⁾、粘土鉱物の種類やその含有量と比抵抗値の相関³¹⁾など、比抵抗値と物性値の相関について多くの研究が進められているものの、実際の測定においては、地質や地下水の分布など比抵抗値に影響を与える要因が多く、比抵抗トモグラフィのみでは地盤構造を推定することは難しい⁵⁾。

音響トモグラフィとは、高周波（数 k～数十 kHz の音響波と呼ばれる可聴帯域の周波数帯）の弾性波を使用し、得られる走時速度や波動の振幅（減衰率）分布から地盤の構造を推定するものである³²⁾。孔内発信器にはピエゾ震源（圧電セラミックス震源）を用い、高周波の弾性波を発振する。また、発振波として疑似ランダム波を採用することにより、発破震源や打撃震源に比べ高精度な波形測定を実現している³³⁾。未固結の地盤だけではなく、固結地盤や多孔質地盤においても、弾性波の周波数に応じて地盤、間隙水、土粒子の挙動が異なり、速度と減衰率は変化する^{34),35)}。そのため、音波速度と減衰率の変化から地盤の土質、地盤内の空洞や障害物の有無などを推定することができる³⁶⁾⁻³⁸⁾。

地盤工学分野では地震波だけではなく、比抵抗トモグラフィにおける比抵抗、音響トモグラフィにおける音響波の走時速度および波動の振幅など、さまざまな指標によるアプローチが行われてきた。指標ごとに地盤内部の多種多様な物性や状態に対し、効果的な変化を示す場合もあれば、推定することが困難な場合もある。一つの指標に固執することなく、あらゆる指標による評価の可能性も検討し、検査目的に対しより効果的な指標の創出、または各指標を総合的に判断して評価することは、コンクリート構造物の健全性評価へのトモグラフィ手法の適用においても十分に検討すべき点であると考ええる。

2.4 弾性波トモグラフィ手法

本節では、本研究の対象とする弾性波トモグラフィ手法の概要、地盤工学分野への適用、ならびにコンクリートの健全性評価への適用に関する既往の研究について述べる。さらに、弾性波トモグラフィをコンクリート構造物健全性評価に適用する場合に解決すべき課題およびその解決方法について記述する。

2.4.1 弾性波トモグラフィ手法の概要

起振点で発生した弾性波は地盤を伝わり受振点に到達するが、その初動走時の経路（波線経路）は、地盤の弾性波速度構造により屈折あるいは回折・散乱し、屈曲する³⁹⁾。例えば前述の X 線 CT では、対象の組織の X 線減衰率を問題にしており、しかも検査対象の速度変化が小さいため、回折・散乱は問題とはならず波線経路は直線として考えることができる。一方、弾性波トモグラフィでは、回折などの現象が、探査対象の物性である波の伝播速度そのものに関係するため本質的な問題であり、波線経路を求める波線追跡法を用いた順解析が必要となる。また、X 線 CT は、対象の全周、全方向からの測定が可能であるのに対し、一般の弾性波トモグラフィでは限られた測点、方向からの測定（物理探査におけるボーリング孔や試掘横杭などからの測定）となることから、弾性波トモグラフィのデータ解析に、X 線 CT で用いられる投影を基本とした逆解析（Fourier 変換法、Radon 法、Filtered Back Projection 法など³⁾）をそのまま適用することは困難である。

そのため、弾性波トモグラフィにおいては、順解析における解析モデルの妥当性も併せて検証する必要がある。図 2.4-1 に示すように順解析と逆解析を反復して行う反復法解析が行われる⁴⁰⁾。対象範囲の弾性波速

度構造による波線の回折・散乱や、限られた測点・方向からの測定という条件は、弾性波トモグラフィをコンクリート構造物の健全性評価へ応用する場合も同様であり、地盤工学分野で発展した弾性波トモグラフィの反復法解析の例（順解析手法および逆解析手法）について、以下に概説する。

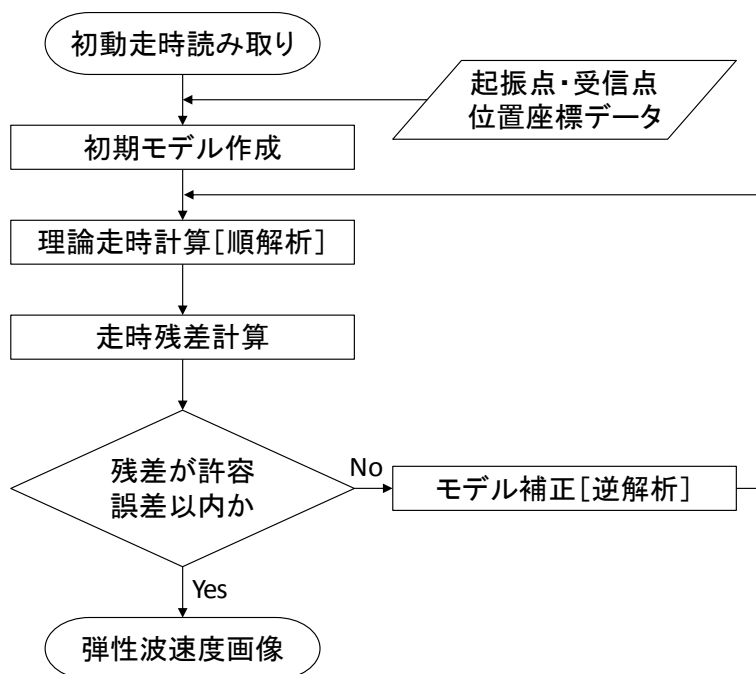


図 2. 4-1 弾性波トモグラフィで利用される反復法解析のフロー

(1) 順解析手法

コンクリート構造物の部材内を伝播する弾性波も地盤内と同様に、発信点と受信点の間に主要部材とは異なる音響インピーダンスを有する媒質や、ひび割れなどの空隙が存在する場合、初動走時の経路は屈折あるいは回折・散乱し、屈曲する。X 線 CT と同様に、波線経路を発信点から受信点までの最短距離である直線と見なし解析を行った場合においても、内部の状態の評価（欠陥部の検出など）は概ね可能である。しかし伊藤らの既往の研究成果⁴¹⁾によれば、欠陥部の周辺の弾性波速度の変動が激しくなる傾向が見られるなど、局所的な波線経路の違いによる影響が顕著になることも報告されている。そのため、より高精度の弾性波速度画像を得るための、走時トモグラフィの順解析には波線経路を求める波線追跡法が必要とされる⁴³⁾。

波線追跡法には、ホイヘンスの原理⁴²⁾を応用した爆発法、波動方程式の差分解法による初動到達時刻を求める方法、およびアイコナル方程式を差分近似で解く方法などが優れた方法として知られている⁴³⁾。波動方程式の差分解法による初動到達時刻を求める方法は、高い精度が期待できるが、計算時間が膨大にかかる。また、アイコナル方程式を差分近似で解く方法⁴⁴⁾は、計算時間も比較的早く、精度も高い方法であるが、発信点近傍において用いている球面波近似により、適用限界を間違えると正しい解が得られないことがある。ホイヘンスの原理を応用した爆発法⁴⁵⁾は計算時間が速く実用的であることから、多くの改良や研究が行われてきた^{46),47)}。ここでは一例として、Sassa, K. et al.⁴⁸⁾により提案された爆発法を改良した波線追跡法（以下、16 方向点波源法）の概要を図 2. 4-2 に示す。

四角形要素で表現されたモデルにおいて、ある節点から弾性波が発信したとする。この発信点から 16 方向

の節点に向けて弾性波を放射し、各節点に発信点からの走時と入射方向を記憶させる。弾性波が到達した節点からも再び弾性波を放射し、同じく発信点からの走時と入射方向を求める。このとき到達した節点に、既に他方から弾性波が到達していれば、記憶情報の中で最も小さい走時を持つものを、その節点における情報として採用する。以上の操作を繰り返すことにより、発信点から各節点に記憶された方向をたどることで、弾性波の波線経路が求められる。

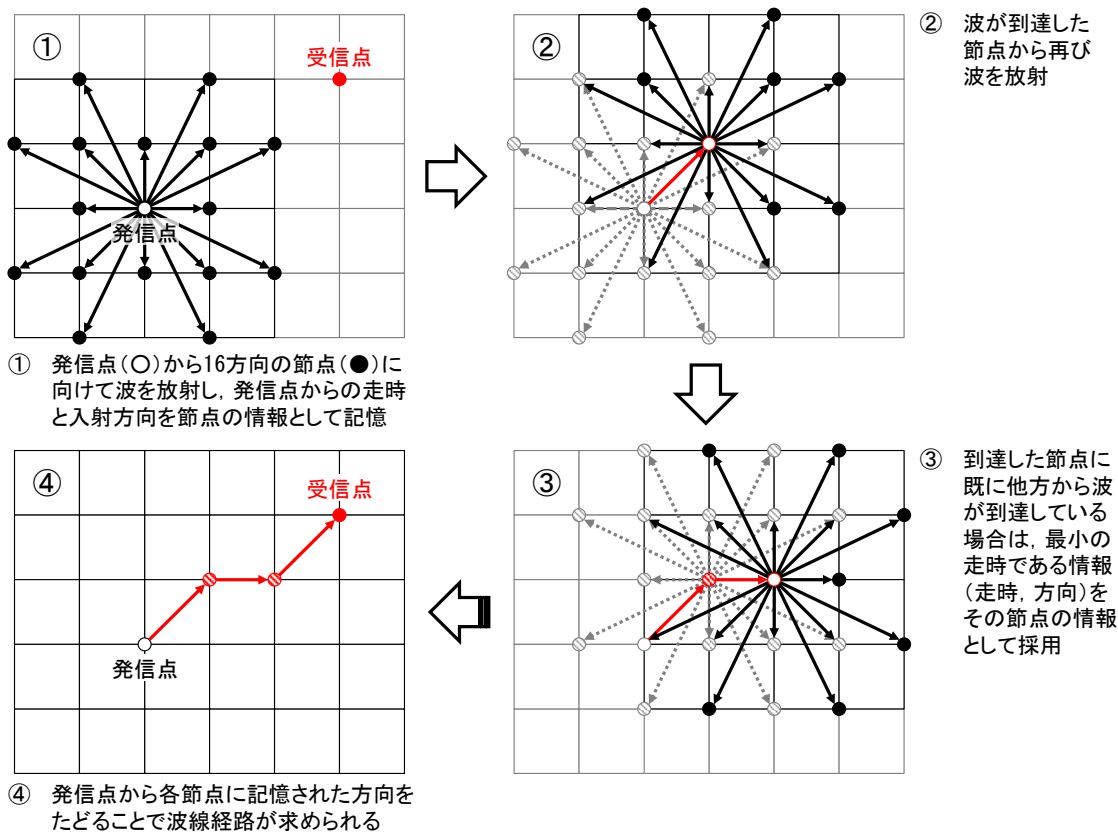


図 2.4-2 16 方向点波源法による波線追跡法

(2) 逆解析手法

トモグラフィにおける逆解析の目的は、観測値を説明できるように要素分割モデルを修正することである。モデルの修正方法としては大別して、走時残差をその波線が通過した要素に振り分ける方法⁴⁹⁾と、走時残差についての方程式を立て、残差を最小にするという条件で最小二乗法を用い、要素ごとのスローネス（速度の逆数）の修正量を求める方法⁵⁰⁾の2つがある。前者は、いわゆる代数的再構成法（Algebraic Reconstruction Technique, 以下、ART 法⁴⁹⁾）と呼ばれ、後者は、最小二乗反復法（Iterative Least Square Technique, 以下、ILST 法³⁾）と呼ばれる。ART 法は、一回の反復計算ごとの解の収束が緩やかであるが安定的に解が得られる。逆に ILST 法の場合、解の収束は速いが、データの不完全さや発信点・受信点の配置の制限などにより解が不安定となることがある。近年のコンピュータの発展から、最近では ART 法が多く用いられている³⁾。

以下に、発信点・受信点の配置の制限などが地盤と比べより顕著になることが容易に予想されるコンクリート構造物への適用を念頭に、弾性波速度を物理量とする走時トモグラフィを例として、ART 法の改良版である同時反復再構成法（Simultaneous Iterative Reconstruction Technique, 以下、SIRT 法⁵⁰⁾）による逆解析手法

について概説する。

ある発信点から受信点までの初動走時の観測値 T_{OBS} （以下、観測走時）は、式(2.4-1)で求められる。

$$T_{OBS} = t_o - t_s \quad (2.4-1)$$

ここで、 t_o は受信時刻、 t_s は発信時刻である。

一方、走時トモグラフィでは、図 2.4-3 に示すように、各要素に初期パラメータとしてスローネス s を与える。要素分割モデルで得られる初動走時の理論値 T_{CAL} （以下、理論走時）は、各要素に与えられたスローネスと、波線追跡法により求められた各要素を横切る波線長を用いて式(2.4-2)により求められ、観測走時に対する理論走時の走時残差 ΔT は式(2.4-3)により求められる。

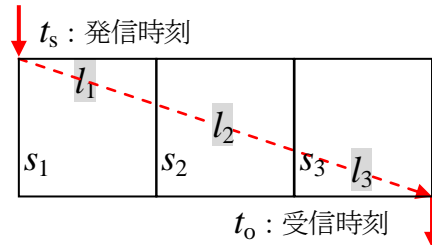


図 2.4-3 走時算出模式図

$$T_{CAL} = \sum_j s_j l_j \quad (2.4-2)$$

$$\Delta T = T_{OBS} - T_{CAL} \quad (2.4-3)$$

ここで、 l_j は要素 j を横切る波線長である。

各波線経路で得られる観測走時に対する理論走時の走時残差を解消するために、各要素のスローネスを補正する。このときのスローネス補正量を SIRT 法により求める。SIRT 法は走時残差と各要素を横切る波線長により、各要素のスローネス補正量を求める手法であり、各要素のスローネス補正量 Δs_j および補正スローネス s'_j は式(2.4-4)、(2.4-5)により求められる。

$$\Delta s_j = \sum_i \frac{\Delta T_i l_{ij}}{L_i} / \sum_i l_{ij} \quad (2.4-4)$$

$$s'_j = s_j + \Delta s_j \quad (2.4-5)$$

ここで、 L_i は i 番目の波線経路の全長、 ΔT_i は i 番目の走時残差、 l_{ij} は波線 i が要素 j を横切る波線長である。このアルゴリズムによって、弾性波測定の結果である多数かつ多方向の観測走時に整合する各要素のスローネス、つまりは各要素の弾性波速度が求められ、対象領域を弾性波速度の画像で表すことができる。

ここまで、Sassa, K. et al.⁴⁸⁾により提案された爆発法を改良した波線追跡法である 16 方向点波源法を示したが、16 方向で得られる経路長は真のパスより必ず長くなり真の解が保証されないこと、また、経路が一意に決まらない場合があることなど、課題も多いため、適用には十分な注意が必要である。

2.4.2 地盤工学分野への弾性波トモグラフィ手法の適用

弾性波トモグラフィの研究は、比抵抗トモグラフィや音響トモグラフィと同じく地盤内の状況を詳細に把握する物理探査手法（ジオトモグラフィ）として1970年代から行われ始め、世界的にはBois et al.の研究が先駆であると考えられている⁵¹⁾。国内では1980年代から数値実験⁵²⁾⁻⁵⁴⁾を中心に盛んに研究が進められてきた。

物理探査としての弾性波トモグラフィの原理は、以下の通りである。まず、地表およびボーリング孔、横杭などを利用して探査対象領域を取り囲むように起振点や受振点を設置し、起振点で起振した際に発生する弾性波を多くの受振点で観測、観測値として初動走時を得る。次に、対象領域を表す要素分割モデルの各要素には弾性波速度（またはスローネスと呼ばれる弾性波速度の逆数）が物理量として与えられ、解析の結果得られる弾性波速度の画像から、地層の分布、断層破碎帯や変質帯の分布、空洞の分布などを弾性波速度と関連付けて推定するというものである⁵⁵⁾。

その後、多くの数値実験により研究が進展し、実地盤への適用性も検討されてきた。羽竜・西川は、60×60 mにもおよぶ海峡連絡橋のような大規模構造物の基礎は、設計にはさらに広い範囲の地盤情報が必要となることに対して、弾性波トモグラフィにより地盤の面的・立体的構造や物性分布を事前に提供できれば、合理的かつ経済的な基礎の設計に寄与することができると考えた。風化花崗岩地域における橋梁予定地点において、ボーリング孔を用いた弾性波トモグラフィを適用し、弾性波速度画像とボーリング調査や地表面からの探査の結果を対比しその有効性を確認している⁵⁶⁾。

また、世一・蓮井は、地下発電所の建設において、掘削過程の進行に伴う側壁岩盤において岩盤の透水性や変位に対して、弾性波の伝播特性の調査を実施し、弾性波が岩盤の変化の指標になることを確認した⁵⁷⁾。さらに、岩盤の挙動推定や内部構造の把握を目的とした孔間弾性波探査システムを製作し、弾性波トモグラフィにより得られた弾性波速度画像から、掘削による影響範囲や岩質の推定を行っている⁵⁷⁾。

1990年代には弾性波トモグラフィの3次元化への拡張についても研究され^{58),59)}、孔間弾性波測定データを基にした3次元の弾性波トモグラフィによる実現場での適用試験が報告されている⁶⁰⁾。

地盤工学分野における弾性波トモグラフィ手法の適用の効果は、大規模な検査対象範囲を、画像化により一括で評価できるという点であり、コンクリート構造物の健全性評価においても期待されるものである。ただし、地盤工学分野に適用されるトモグラフィ手法は、数十 m～数 km と大規模な範囲の測定対象を数 m～数十 m という大まかな区分で評価するものである。また、センサは地表面またはボーリング坑内に設置するため、測定者が自由にセンサを配置できる。したがって、要素形状が矩形などに制限された簡略的な2次元あるいは3次元の解析モデルで表現でき、精度面でも十分に要求に応えることができています。

一方、コンクリート構造物の健全性評価への適用においては、数 m～数十 m 規模の構造部に対して、数 mm～数 cm の欠陥の検出が要求されている。また、コンクリート構造物の形状はさまざまであり、センサの配置が制約される簡略化された2次元あるいは3次元の解析モデルでは、評価精度が低下する、あるいは解析自体ができないこととなる。

したがって、コンクリート構造物の健全性評価へ弾性波トモグラフィ手法を適用するためには、構造物形状に合わせられる自由度の高い解析モデルの利用を可能にするとともに高精度化が必要と考えられる。

2.4.3 コンクリート構造物の健全性評価への弾性波トモグラフィ手法の適用

顕在化してきたコンクリートの耐久性に対する早期劣化などの影響もあり、コンクリート内部の状態を適

切に把握したいというニーズの高まりから、コンクリート工学分野においても内部可視化技術としてトモグラフィが脚光を浴びてきた。1980年代後半から、X線CTを利用したコンクリート試験体の内部の空隙分布の測定⁶¹⁾や、短繊維分散状態などの定量的な把握⁶²⁾などが報告されている。しかし、X線CTは、放射線の人体被ばくの懸念や機器運用に資格が必要であるための取扱いの難しさ、導入コストの高さなどから適用は限定的であった。そして、2000年頃から、医療施設や高度研究施設などでの利用に限られるX線CTに替わり、比較的入手しやすい超音波発生器を利用した弾性波トモグラフィを利用する研究が多く報告されるようになってきた^{63),64)} (図2.4-5)。X線CTに比べ、被ばくする危険性が無く、コストも優位であり、コンクリートに対して透過能力が高いことから、弾性波トモグラフィはコンクリートの健全性評価技術として着目され、コンクリート試験体の骨材の影響や細孔構造の把握⁶³⁾、実構造物から採取したコアの品質推定⁶⁴⁾などの研究が進められた。ただし、これらは全て対象は試験体で、X線CTと同様に多数かつ多方向からの測定が可能な条件であり、トモグラフィの解析に関しては特に言及していないことから、この時代は、波線経路を最短距離である直線とみなした、波線追跡を行わない解析手法であったと考えられる。

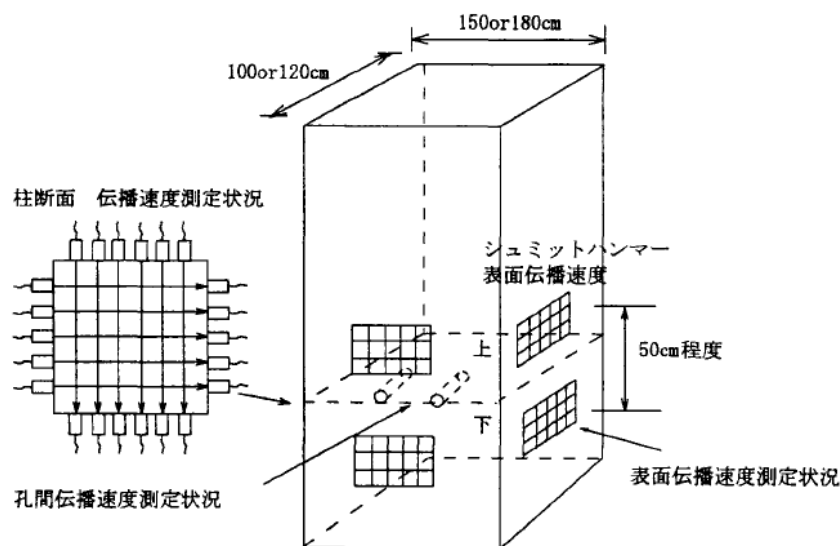


図 2.4-5 柱断面の伝播速度測定状況 (2点間の弾性波速度の測定)⁶⁴⁾

実構造物への適用として、Liu and Guo が、鉄筋コンクリート橋脚の水平断面 6×8 m において、ハンマ打撃による弾性波測定を行い、弾性波トモグラフィを用いて内部の健全性を弾性波速度画像で可視化している⁶⁵⁾ (図2.4-6 および図2.4-7)。機械的に発信される超音波よりも透過能力の高い衝撃弾性波により、実構造物への適用が可能であることが示されている。ただし、前述の試験体レベルの研究と同様に、波線追跡を行わない解析手法であったと考えられる。しかし、弾性波は、弾性波速度構造により波線の回折・散乱が発生するため、コンクリート構造部の健全性評価のように、欠陥の存在が疑われる構造物への適用においては、波線経路を直線と見なす解析では評価が困難である。そこで波線追跡法によって波線経路を探索・追跡する方法 (図2.4-2) が提案された。

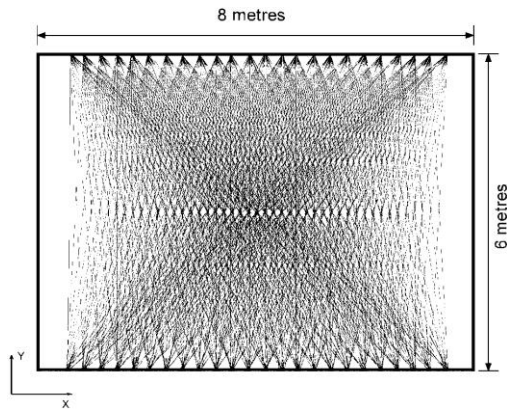


図 2.4-6 橋脚(6m×8m)断面における
解析に用いた波線⁶⁵⁾

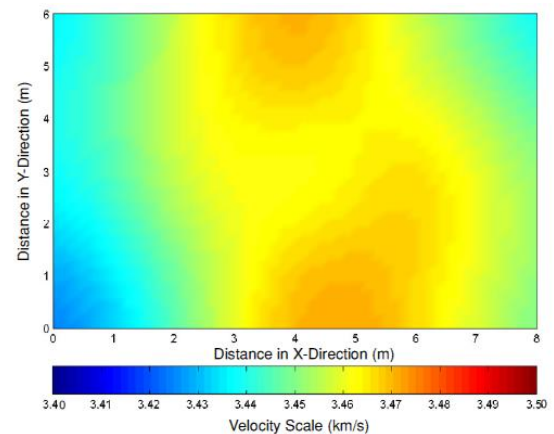


図 2.4-7 弾性波速度分布⁶⁵⁾

塩谷らは、70 年以上経過した鉄道コンクリート橋脚（無筋コンクリート）の補修効果確認に弾性波トモグラフィを適用している。対象範囲は橋脚鉛直断面（台形断面）上底 2.07 m，下底 2.31 m，高さ 2.5 m であり，鋼球打撃による弾性波測定を行っている⁶⁶⁾。ここで，塩谷らは，弾性波の伝播経路を考慮し，2.4.1 で示した波線追跡法と反復法解析を行うトモグラフィ解析を実施しており，橋脚内部の 2 次元的な弾性波速度分布や補修前後における速度分布の変化を確認している⁶⁶⁾（図 2.4-8）。

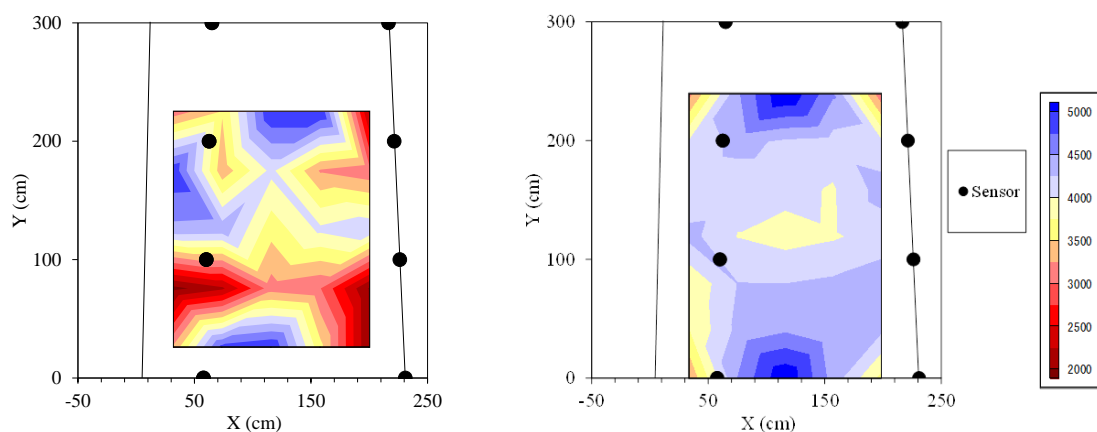


図 2.4-8 弾性波速度分布（左：補修前，右：補修後）⁶⁶⁾

この方法は，従来の弾性波法の長所を活かしながら同時に課題を解決することが可能であり，具体的には以下の優れた点を有している。

1) 健全性評価の高精度化

弾性波法では，検査結果が「点」あるいは「線（線上の平均）」の 1 次元情報であったため，個々の検査結果の精度が不明であるとともに，欠陥部が複数存在する場合には評価精度が低下する恐れがあった。これに

対して弾性波トモグラフィ手法では、欠陥部を複数の方向から評価することになり、1 方向では検出できなかった欠陥部の検出も可能となる。さらに、検査対象領域において全ての検査結果の最適化を図ることにより、評価結果の高精度化が可能となる。

2) 健全性の面的評価（可視化）

前述の通り従来の弾性波法の検査結果は1次元情報で与えられるため、広がりをも有する構造物全体の健全性評価には適していなかった。弾性波トモグラフィ手法は、弾性波法で得られた複数の1次元情報を数値処理し、2次元情報として客観的に表すため、構造物の健全性評価を容易に行うことが可能である。特に、不健全部位の検出（スクリーニング）では一目で不健全部の評価が可能であり、他の方法に比べて高い優位性を発揮する。

3) 健全性の標準化

前述のように、弾性波トモグラフィ手法では弾性波速度などの評価指標を面的に示すことが可能であり、健全性評価においては専門的技術者を必要とせず、調査結果を記録に残すことも容易である。そのため、打音検査のように検査結果が検査者の能力や経験に依らないことから同一箇所に対して継続的な評価が可能となり、コンクリート構造物の健全性評価の標準化を図ることができる。また、補修前後に評価を行うことにより、欠陥部に対する補修効果の確認にも適用することが可能である。

以上のことから、弾性波トモグラフィ手法はコンクリート構造物の健全性評価において、更なる高精度化が可能で、面的な評価（可視化）、標準化も可能となる極めて有用な技術と考えられる。

コンクリート構造物に対する弾性波トモグラフィ技術の現状を、表 2.4-1 および表 2.4-2 にまとめた。また、現状を示す鳥瞰図を図 2.4-9 に示す。これらの現状から浮かび上がる課題について以下に記す。

表 2.4-1 に示すように塩谷ら⁶⁶⁾の弾性波トモグラフィ手法は、伝播経路の追跡は直線ではなく、波線追跡法と進化してはいるが、限定された形状にセンサを配置する必要があり、かつ評価対象は2次元平面に限定されていた。そのため、実構造物へ適用するには、3次元空間に拡張する必要があった（図 2.4-10①）。また、弾性波トモグラフィ手法は、弾性波法で得られた評価指標の精度を向上させるとともに、結果を客観的かつ面的に表現することが可能である。そのため、弾性波トモグラフィ手法による健全性の評価精度は、弾性波法の評価指標に左右される。したがって、評価精度の向上を目的に、コンクリートの劣化などの変状に敏感な健全性評価指標の提案が求められる（図 2.4-10②）。さらに、表 2.4-2 に示すように、実構造物に対する適用性は不十分である。従来の弾性波トモグラフィ手法では適用不可能なトンネル覆工コンクリートのようなセンサ配置が片側表面に制限されるコンクリート構造物などへの適用範囲の拡大が求められる（図 2.4-10③）。また、コンクリート構造物の健全性評価は道路や鉄道など供用中の構造物に対して行われる場合が多いため、センサ設置を含む調査時間に制約があり、計測時間の短縮が求められる。そのため、評価精度を保持したままで計測の効率化を図る必要がある（図 2.4-10④）。

表 2. 4-1 弾性波トモグラフィ技術の現状のまとめ (その 1)

	適用対象	目的	測定次元	評価次元	測定方法	伝播経路	トモグラフィ解析
山下ら ⁶³⁾ (1999)	供試体 φ100×200 mm	コンクリート品質 (水セメント比)	1次元 ※1 発信 に対し 1 受信	2次元	単測定 繰り返し	直線	重ね合わせ
山下ら ⁶⁴⁾ (2000)	実構造物 (橋脚) 1.2×1.8 m (水平断面)	コンクリート品質 (表面と内部の 速度比較)	1次元	2次元	単測定 繰り返し	直線	重ね合わせ
Liu and Guo ⁶⁵⁾ (2005)	実構造物 (橋脚) 6 × 8 m (水平断面)	コンクリート内の 欠陥の有無	2次元 ※1 発信 を複数で 受信	2次元	多点同時 測定	直線	重ね合わせ
塩谷ら ⁶⁶⁾ (2006)	実構造物 (橋脚) 2 × 2.5 m (鉛直断面)	コンクリート内の 欠陥の位置・規模と 補修効果の評価	2次元	2次元	多点同時 測定	波線追跡	反復解析

表 2. 4-2 弾性波トモグラフィ技術の現状のまとめ (その 2)

	波線 : 測定	指標	使用する波	感度	波の回折 の考慮	精度	複雑な形状 への適用	適用性	測定 効率
山下ら ⁶³⁾ (1999)	1 波線 : 1 測定	伝播 速度	実体波 (P 波)	△	×	×	○	△	△
山下ら ⁶⁴⁾ (2000)	1 波線 : 1 測定	伝播 速度	実体波 (P 波)	△	×	×	○	△	△
Liu and Guo ⁶⁵⁾ (2005)	24 波線 : 1 測定	伝播 速度	実体波 (P 波)	△	平面内△, 奥行き×	△	○	△	○
塩谷ら ⁶⁶⁾ (2006)	6 波線 : 1 測定	伝播 速度	実体波 (P 波)	△	平面内○, 奥行き×	○	△	△	○

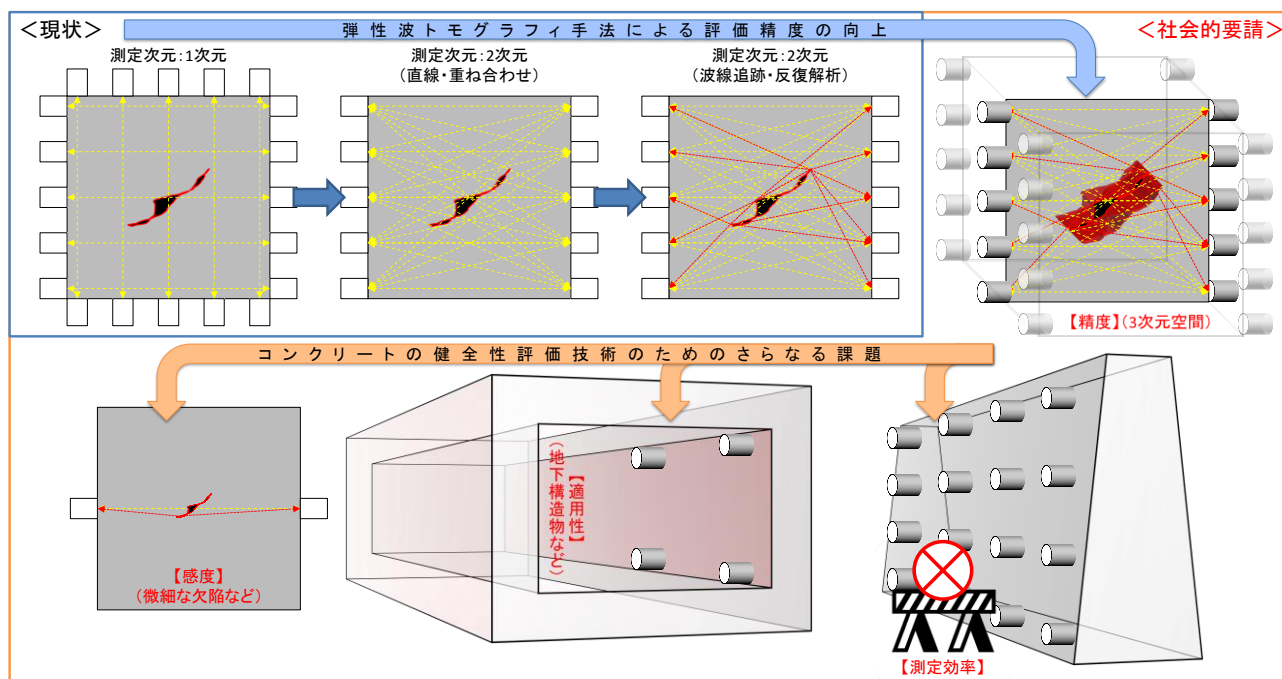


図 2. 4-9 弾性波トモグラフィの現状を示す鳥瞰図

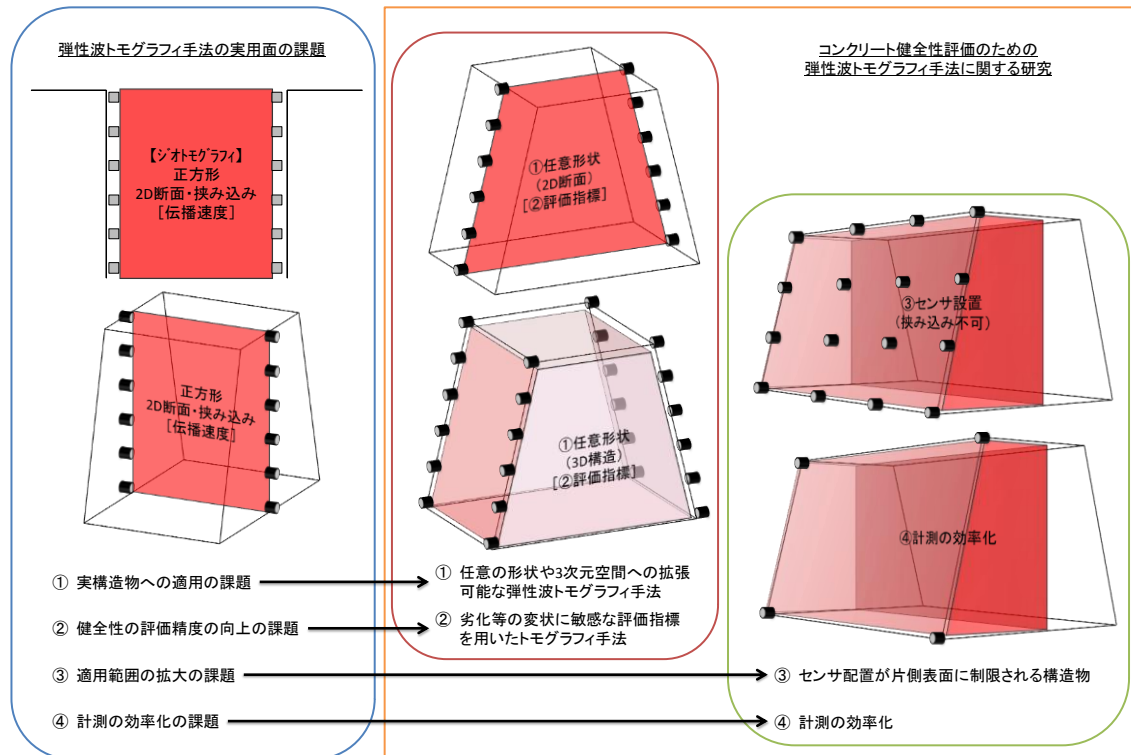


図 2. 4-10 弾性波トモグラフィ実用化のために解決すべき課題

2.5 まとめ

本章では、トモグラフィの概要を示した後に、トモグラフィ手法の歴史や医療分野および地盤工学分野への適用に関する既往の研究について述べた。また、弾性波トモグラフィ手法の概要、地盤工学分野への適用に関する既往の研究、ならびに、コンクリート構造物の健全性評価への適用に関する既往の研究について述べ、弾性波トモグラフィ手法の有用性を示した。以下に、弾性波トモグラフィをコンクリート構造物健全性評価に適用する場合に解決すべき課題およびその解決方法の概要を記述する。

① 実構造物への適用（3次元空間への拡張）

【課題】

弾性波トモグラフィ手法では、伝播経路の追跡は波線追跡法を用いるが、現状の波線追跡法の対象は2次元平面で、センサは四角形要素で分割された節点上に配置しなければならないという制約がある。様々な形状を持つコンクリート構造物の健全性を高精度に評価するためには、任意の位置にセンサを配置することを可能とするとともに、対象を2次元平面から3次元空間へ拡張をすることが必要である。

【解決方法】

実構造物への適用の課題に対しては、有限要素法を応用し、任意の3次元形状に対応可能な非制限波線追跡法を提案する。さらに提案手法を実構造物に適用し妥当性を検証する。

② 健全性の評価精度の向上（新たな指標の導入）

【課題】

現状の弾性波トモグラフィ手法では、健全性の評価指標に弾性波の伝播速度を使用している。コンクリー

トの欠陥部（ひび割れや空洞など）が比較的大きい場合には、弾性波は欠陥部を避けて伝播するため、伝播経路は走査線長（発信点と受信点を結んだ直線）に比べて長くなり、弾性波の伝播速度が低下する。一方、欠陥部が微細な場合、伝播経路は走査線長とほぼ等しくなり、伝播速度の低下という指標では欠陥の検出が困難となる。したがって、微細な欠陥を検出対象とするためには、弾性波の伝播速度に代わる欠陥に敏感な指標の提案が要求されている。

【解決方法】

健全性の評価精度の向上の課題に対しては、弾性波が欠陥部を通過する際にエネルギー損失が生じることに着目し、評価指標に弾性波の振幅・エネルギーを用いた減衰トモグラフィ手法を提案する。さらに提案手法を実構造物に適用し妥当性を検証する。

③ 適用範囲の拡大（センサ配置が片側表面に制限される構造物への適用）

【課題】

現状の弾性波トモグラフィ手法は打撃などの外力により生じた実体波の透過弾性波を利用することから、計測対象のコンクリート構造物を挟み込むようにセンサを配置することが必要とされた。トンネル覆工コンクリートや擁壁のようにセンサ配置が片側表面に制限されるコンクリート構造物には本手法の適用が不可能となるため、片側表面から検査可能な技術の手法が要求される。

【解決方法】

適用範囲の拡大の課題に対しては、深さ方向の情報を有する表面波を健全性の評価指標に用いることにより、片側表面から健全性を評価できる一面配置弾性波トモグラフィ手法を提案する。さらに提案手法を模擬欠陥試験体に適用し妥当性を検証する。

④ 計測の効率化

【課題】

コンクリート構造物の健全性評価を実用化する上では、評価精度と分解能の向上が求められる。弾性波トモグラフィ手法において評価精度と分解能を向上させるためには、センサ設置数を増やす必要があるが、センサ設置数と調査時間との間にはトレードオフの関係がある。しかし、一般のX線CTなど対象が小規模な場合と異なり、道路や鉄道など供用中の構造物の場合、コスト最小化の観点からセンサ設置を含む調査時間に制約があり、その短縮が求められる。このため、評価精度と分解能を低下させることなく、調査時間を短縮する必要がある。

【解決方法】

計測の効率化の課題に対しては、従来から非破壊検査法として使用されている打音検査を弾性波探査法と併用し、センサ数を増やすことなく解析精度の分解能を確保する打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法を提案する。さらに提案手法を実構造物に適用し妥当性を検証する。

第2章の参考文献

- 1) John F. Hughes, Andries van Dam, Morgan McGuire, David F. Sklar, James D. Foley, Steven K. Feiner and Kurt Akeley: Computer Graphics Principles and Practice 3rd edition, Addison-Wesley Inc., 2013.
- 2) Avinash C. Kak and Malcolm Slaney: Principles of Computerized Tomographic Imaging, IEEE Press, 1999.
- 3) 医用画像工学会（監）：医用画像工学ハンドブック，篠原出版，441 p., 1994.
- 4) 松岡俊文：インバージョンにおける数値解法—最小二乗法を中心にして—，物理探査，第19巻，第6号，pp. 14-30，1986.
- 5) （社）物理探査学会：新版 物理探査適用の手引き（—土木物理探査マニュアル2008—），539 p., 2008.
- 6) Radon, J. K. A.: Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten, Math.-Phys., Vol. 69, pp. 262-277, 1917.
- 7) Cormack, M.: Representation of a function by its line integrals with some radiological applications, J. Appl. Phys., Vol. 34, pp. 2722-2727, 1963.
- 8) Cormack, M.: Representation of a function by its line integrals with some radiological applications II, J. Appl. Phys., Vol. 35, pp. 2908-2913, 1964.
- 9) Hounsfield, G. N.: Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system. Br J Radiol 46, pp. 1016-1022, 1973.
- 10) P. C. Lauterbur, D. M. Kramer, W. V. House and C. -N. Chen.: Zeugmatographic high resolution nuclear magnetic resonance spectroscopy. Images of chemical inhomogeneity within macroscopic objects, J. Am. Chem. Soc. 97, pp. 6866-6868, 1975.
- 11) 尾内能夫：放射線医学における医学物理学，日医放物理会誌，Vol. 6, No. 1, pp. 15-30，1986.
- 12) 末次大輔：表面波トモグラフィーによる3次元地球内部構造の研究，地学雑誌，Vol. 104, No. 7, pp. 119-1031, 1995.
- 13) 吉澤和範：表面波インバージョンによる上部マントル内部の推定，地震，Vol. 57, pp. 393-408，2005.
- 14) 神谷眞一郎：地震波トモグラフィーから見た南関東地方の蛇紋岩体，神奈川博調査研報（自然），Vol. 14, pp. 175-180，2012.
- 15) 田中宏幸：ミュー粒子を用いた火山内部のイメージング，日本物理学会誌，Vol. 65, No. 2, pp. 70-80，2010.
- 16) 鈴木敬一：宇宙線ミュー粒子を利用した地盤探査システムの開発，物理探査ニュース第6号，pp. 8-10，2010.
- 17) 鈴木敬一，大沼寛，奥村忠彦，宮川彰彦：宇宙線ミュー粒子を利用した空洞探査システム，土木学会第65回年次学術講演会，pp. 367-368，2000.
- 18) Woodhouse, J. H. and A. M. Dziewonski: Mapping the upper mantle: Three-dimensional modeling of Earth structure by inversion of seismic waveforms, J. Geophys. Res., Vol. 89, pp. 5953-5986, 1984.
- 19) 菅野強，佐々宏一：孔間および地表孔間比抵抗探査モデリング，物理探査，Vol. 41, No. 1, pp. 1-17，1988.
- 20) 島裕雅：比抵抗トモグラフィの基礎と応用，物理探査，Vol. 42, No. 6, pp. 442-457，1989.
- 21) 小島圭二，神尾重雄，石橋弘道，内山成和，斎藤秀樹，島裕雅：ジオトモグラフィーによる岩盤の画像

- 化（その2）—岩盤内の地下水の流れの画像化—, 応用地質, No. 30, Vol. 4, pp. 179-188, 1989.
- 22) 小島圭二, 神尾重雄, 石橋弘道, 内山成和, 斎藤秀樹, 島裕雅: ジオトモグラフィによる岩盤の画像化（その1）—岩盤内の物性分布の画像化—, 応用地質, No. 30, Vol. 3, pp. 121-130, 1989.
- 23) 藤山敦, 西園政則, 吉田真一, 佐々木利明, 太田尚: ジオトモグラフィ手法によるダムサイトにおけるグラウチング効果の判定, 応用地質年報, No. 16, pp. 53-72, 1994.
- 24) 小峯秀夫, 後藤和生: 現場試験による比抵抗トモグラフィを利用した薬液注入の改良範囲評価方法の実証, 土木学会論文集, No.603/ III-44, pp. 129-138, 1998.
- 25) 鈴木浩一: 物理探査法の地質工学への適用（その3）—硬質岩盤の透水性評価への適用例—, 物理探査, Vol. 51, No. 1, pp. 83-95, 1998.
- 26) 杉本芳博: 2.5次元FEMによる線電流源周辺の電位計算, 物理探査, Vol. 51, No. 1, pp. 55-69, 1998.
- 27) 鈴木浩一, 東義則, 城森信豪: 512成分比抵抗法自動測定装置の開発, 物理探査, Vol. 51, No. 3, pp. 210-218, 1998.
- 28) Archie, G. E.: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans.AIME, Vol. 146, pp. 54-62, 1942.
- 29) 千葉昭彦, 熊田政弘: 花崗岩及び凝灰岩資料の比抵抗測定—間隙水の比抵抗が岩石比抵抗に及ぼす影響について—, 物理探査, Vol. 47, No. 3, pp. 161-172, 1994.
- 30) 関根一郎, 西牧均, 石垣和明, 原敏明, 斎藤章: 岩石の比抵抗値とその力学的性質との関係, 土木学会論文集, No. 541, III-35, pp. 75-86, 1996.
- 31) 高倉伸一: 粘土鉱物を含む試料の比抵抗と物理・化学・力学的特性の関係, 物理探査, Vol. 53, No. 5, pp. 415-426, 2000.
- 32) Dvorkin, J. and Nur, A.: Dynamic poroelasticity: A unified model with the squirt and the Biot mechanisms, Geophysics 58, No. 4, pp. 524-533, 1993.
- 33) 榊原淳一, 田中真人, 田近久和: 音響トモグラフィを用いた構造物設備診断技術, JFE 技報, No. 11, pp. 50-55, 2006.
- 34) Biot, M. A.: Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid.I. Low-Frequency Range, Reprinted from Journal of Acoustical Society of America 28, pp. 168-178, 1956.
- 35) 松廣紀夫: 超音波による魚群探知技術, 日本音響学会誌, Vol. 61, No. 11, pp. 665-670, 2005.
- 36) Yamamoto, T., Nye, T. and Kuru, M.: Porosity, permeability, shear strength: Crosswell tomography below an iron foundry, Geophysics, Vol. 59, No. 10, pp. 1530-1541, 1994.
- 37) 榊原淳一, 山本督夫: 高周波数の弾性波を用いた高精度地盤調査法の開発, 土木学会論文集 C, Vol. 65, No. 1, pp. 97-106, 2009.
- 38) 榊原淳一, 石原謙治, 山尾和行: 音響トモグラフィ法による薬液注入の改良範囲の把握, 基礎工, Vol. 41, No. 9, pp. 87-89, 2013.
- 39) 宇津徳治, 嶋悦三, 吉井敏尅, 山科健一郎: 地震の事典[第2版], 朝倉書店, pp. 78-119, 2001.
- 40) 大友秀夫: ジオトモグラフィ技術の現況, 物理探査, 第39巻, 第6号, pp. 58-71, 1986.
- 41) 伊藤崇晃, 関俊力, 高橋辰弥, 小野晃, 山田和夫: 波線追跡法を適用した弾性波トモグラフィ法によるコンクリートの内部探査の推定精度, 日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集, pp.

1229-1230, CD-ROM, 2013.

- 42) Longhurst R. S.,: Geometrical and Physical Optics, 2nd Edition, Longmans, 1968.
- 43) 松岡俊文, 江坂照也: レシプロカルプリンシプルに基づくレイトレーシングについて, 物理探査学会第 81 回学術講演論文集, pp. 107-112, 1989.
- 44) Vidale, J.: Finite-Difference Calculation of Travel Times, B. S. S. A., Vol. 78, pp. 2062-2076, 1988.
- 45) 伊藤憲一, 斎藤猛, 山田英雄: 電子計算機を使用して屈折法のパス計算を近似的に行う一方法, 物理探査学会第 68 回学術講演予稿集, pp. 11-12, 1983.
- 46) 佐々宏一, 芦田譲, 小澤岳史, 山田雅行: 効果的なレイトレーシングによるサイスミックトモグラフィの精度向上について, 物理探査学会第 78 回学術講演論文集, pp. 92-93, 1988.
- 47) 山田雅行, 小澤岳史, 白旗秀紀, 佐々宏一: 弾性波トモグラフィ解析に利用するレイトレーシングについて, 物理探査学会第 80 回学術講演論文集, pp. 27-29, 1989.
- 48) Sassa, K., Ashida, Y., Kozawa, T. and Yamada, M.: Improvement in the Accuracy of Seismic Tomography by use of an Effective Ray-Tracing Algorithm, MIJ/IMM Joint Symposium Volume Papers, pp. 129-136, 1989.
- 49) Kaczmarz, S.: Angenaherte auflosung von systemen lenearer gleichungen, Bull lut Acad Pol Sci Lett A, pp. 355-357, 1937.
- 50) Gilbert, P.: Iterative methods for the three-dimensional reconstruction of an object from projections, J Theor Biol 36, pp. 105-117, 1972.
- 51) Bois, P., La Porte, M., Lavergne, M. and Thomas, G.: Essai de determination automatique des vitesses sismiques par mesures entre puits, Geophys. Prosp., Vol. 19, pp. 42-83, 1971.
- 52) 岡本栄, 三沢政次郎: 坑(孔)間速度測定における逐次近似法によるメッシュ速度表示について, 物理探査学会第 69 回学術講演予稿集, pp. 55-56, 1983.
- 53) 稲崎富士, 高橋幸夫, 吉田武志: 地質断面法 (Geotomography) その 1 - 直線波線によるモデル解析 -, 物理探査学会第 70 回学術講演予稿集, pp. 18-19, 1984.
- 54) 杉本芳博, 西田薫, 池田研一: 坑(孔) - 坑(孔)間速度ゾーニング法について, 物理探査学会第 72 回学術講演予稿集, pp. 9-10, 1985.
- 55) 物理探査学会: 物理探査適用の手引き (とくに土木分野への利用), pp. 39-40, 2000.
- 56) 羽竜忠男, 西川貢: クロスホール・サイスミックトモグラフィの橋梁基礎地盤調査への適用性 (その 2) - 実施例 -, 物理探査学会第 75 回学術講演予稿集, pp. 47-48, 1986.
- 57) 世一英俊, 蓮井昭則: 孔間弾性波測定とそのジオトモグラフィ結果について, 物理探査学会第 77 回学術講演論文集, pp. 80-83, 1987.
- 58) Saito, H.: 3-D ray tracing method based on Huygens' principle, 60th Annual International Meeting, Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, pp. 1024-1027, 1990.
- 59) 渡辺俊樹: 3 次元弾性波トモグラフィ, 物理探査, 第 51 巻, 第 6 号, pp. 613-624, 1998.
- 60) 山本拓治, 白鷺卓, 富田諭, 青木謙治: 3 次元孔間弾性波トモグラフィによるグラウト効果の評価, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 203-208, 2003.
- 61) 内川浩: X 線 CT 法, 水銀圧入法および気体吸着法によるコンクリート硬化体中の空隙径分布の測定, セメント技術年報, Vol. 42, pp. 208-211, 1988.

- 62) 林隆介, 山田寛次 : X 線 CT 法による炭素繊維強化モルタル中の短繊維分散状態の定量化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, pp. 1049-1052, 1990.
- 63) 山下英俊, 堺孝司, 島田久俊, 丸茂文夫 : セメント硬化体の超音波伝播速度に及ぼす骨材および細孔構造の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, pp. 1273-1278, 1999.
- 64) 山下英俊, 堺孝司, 熊谷守晃, 喜多達夫 : 実構造物におけるコンクリートの超音波による品質評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 22, No. 1, pp. 361-366, 2000.
- 65) Lanbo Liu and Tieshuan Guo: Seismic non-destructive testing on a reinforced concrete bridge column using tomographic imaging techniques, Journal of Geophysics and Engineering, Vol. 2, pp. 23-31, 2005.
- 66) 塩谷智基, 羅休, 羽矢洋 : コンクリート構造物の非破壊検査手法における損傷認定と補修効果, 電力土木, No. 322, pp. 79-84, 2006.

第3章 非制限波線追跡法を用いた弾性波トモグラフィ手法に関する研究

3.1 はじめに

本章では、第2章で述べた弾性波トモグラフィ手法における「①実構造物への適用」の課題を解決するため、任意の3次元形状に対応可能な波線追跡法を提案する。同時に解析精度を向上させるため、弾性波の伝播速度を逐次更新可能な新しい解析アルゴリズムを提案し、実構造物への適用結果から提案手法の有効性を実証する。

3.2 弾性波トモグラフィ手法の実構造物への適用上の課題と非制限波線追跡法の提案

2.4.1 で述べたように、弾性波トモグラフィ¹⁾は順解析と逆解析を反復して行う反復解析により、波線経路の妥当性を検証しモデルを修正する。順解析において、伝播経路の追跡は波線追跡法を用いるが、現状の波線追跡法では限定された形状にセンサを配置する必要があり、かつ評価対象は2次元平面に限定されていた。そのため、任意の形状もしくは場所にセンサを配置することが可能な波線追跡法の高度化が要求されるとともに、2次元平面から3次元空間への拡張も要求される。

この課題を解決する手法として、数値解析手法として一般的に使われる有限要素法の要素分割モデルに着目し、このモデルにおいて波線追跡を実施することが可能な手法（以下、非制限波線追跡法²⁾）を提案する。

有限要素法では、2次元であれば三角形要素や四角形要素、3次元であれば四面体要素や六面体要素、または、それぞれ両要素を組み合わせた要素分割モデルによって、対象となる領域を表現する。有限要素法における要素分割モデルでの反復解析の実施を可能にすることで、あらゆる領域の形状に対して波線追跡法³⁾が適用できる。

以下に、2次元モデルを対象に本手法について示す。図3.2-1に示すような三角形要素や四角形要素が混在する要素分割モデルにおいて、ある節点から弾性波が発信したとする。

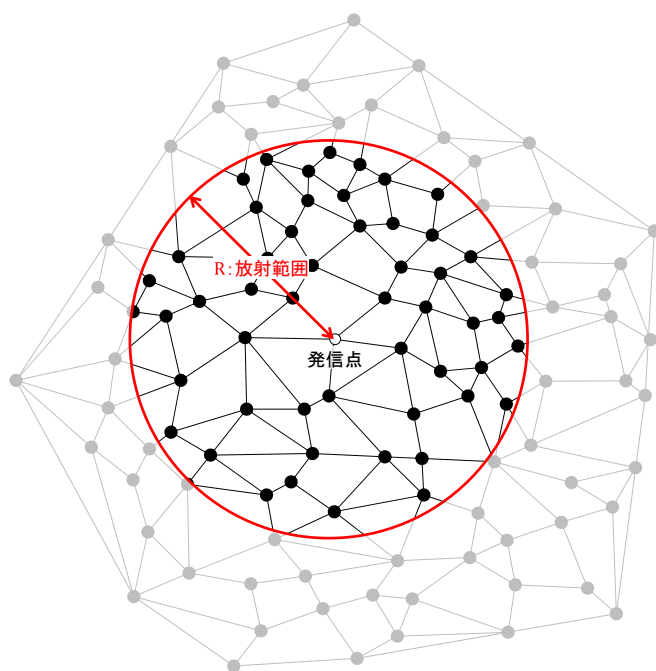


図3.2-1 非制限波線追跡法における発信点からの弾性波の放射範囲

このとき、順解析における解析条件として与えられる弾性波の範囲 R 内に存在する全ての節点に向けて、発信点から弾性波を放射し、到達した各節点に発信点からの走時と入射方向を記憶させる。弾性波が到達した節点は、新たな発信点として同様に範囲 R 内に存在する全ての節点に向けて弾性波を放射する。到達した節点に、既に他方から弾性波が到達していれば、記憶情報の中で最も小さい走時を持つものを、その節点における情報として採用する。以上の操作を繰り返すことにより、発信点から各節点に記憶された方向をたどることで、弾性波の波線経路が求められる。放射範囲 R は無限大とすることにより、要素分割モデルの全ての節点が対象となり、考えられる全ての経路を探索することになる。

非制限波線追跡法では、各要素を横切る波線長を求めるために波線経路と各要素の境界との交点 (x, y) の座標を求める必要がある。この交点の座標は、各要素を単純な形状から写像することによって容易に求めることができる。例えば 2 次元の四角形要素による要素分割モデルであれば、以下に示す関数によって、図 3.2-2(a) に示す全体座標系における四角形要素は、図 3.2-2(b) に示す正規化された要素座標系における正方形要素より写像される（図 3.2-2 参照）。

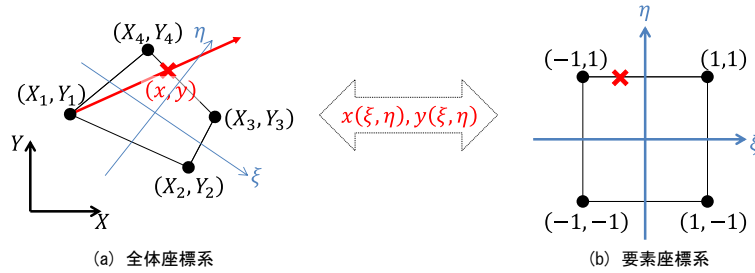


図 3.2-2 正規化された要素座標系から全体座標系における要素への写像

$$x(\xi, \eta) = \sum_i^4 N_i(\xi, \eta) X_i \quad (3.2-1)$$

$$y(\xi, \eta) = \sum_i^4 N_i(\xi, \eta) Y_i \quad (3.2-2)$$

ここで、 x および y は波線経路と要素境界の交点の全体座標系における座標、 ξ および η は写像される要素座標系における交点の座標、 X_i および Y_i は全体座標系における要素の頂点 ($i=1\sim 4$) の座標、 $N_i(\xi, \eta)$ は形状関数と呼ばれ、次のように表される。

$$\begin{aligned} N_1(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta) \\ N_2(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta) \\ N_3(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta) \\ N_4(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta) \end{aligned} \quad (3.2-3)$$

要素を横切る波線は明らかに直線であるため、この直線は全体座標系において以下の式で表される。

$$ax + by + c = 0 \quad (3.2-4)$$

ここで、 a 、 b および c は係数である。この直線の要素座標系における表現は、式(3.2-1)、(3.2-2)を式(3.2-4)に代入することにより、以下のように示される。

$$a \sum_i^4 N_i(\xi, \eta) X_i + b \sum_i^4 N_i(\xi, \eta) Y_i + c = 0 \quad (3.2-5)$$

これにより、波線と要素境界との交点は、式(3.2-5)に要素境界の要素座標系における座標を代入することによって求めることができる。

非制限波線追跡法は、例として示した2次元の要素分割モデル（三角形要素、四角形要素）のみならず、3次元の要素分割モデル（四面体要素、六面体要素）にも応用できる。この非制限波線追跡法を順解析手法として用いた弾性波トモグラフィ手法は、センサ配置やモデル化の制約がなく、3次元的な評価が可能であり、実構造物へ適用可能となる。

3.3 非制限波線追跡法を用いた弾性波トモグラフィ手法による健全性評価の現場検証

3.3.1 はじめに

非制限波線追跡法を用いた弾性波トモグラフィ手法による健全性評価の適用性を検証する目的で、本手法を実際のコンクリート構造物に適用した^{2),4),5)}。

従来の弾性波トモグラフィ手法は、実構造物をセンサで2次元平面的に挟み込む計測・評価⁶⁾にのみ適用可能で、3次元的な評価はできなかった。本節は、既往の弾性波トモグラフィ手法では適用できない複雑な形状をもつ構造物を3次元的に評価するものである。

3.3.2 現場検証の概要

写真3.3-1示す北海道電力（株）藻岩発電所は、建設以来約70年を経過していることから、コンクリート造取水堰の設備保全と延命化を図るために平成16年から3か年計画で抜本的な補修工事を実施している。本取水堰ピアのコンクリートには、調査および補修経歴より、内部にポーラスな部分の存在が判明していたことから、グラウチングにより内部を充填する補修工法が選定された。

このとき、補修効果の検証を目的として、充填によるコンクリート内部の密実性の向上を把握する必要があった。従来は、グラウチング前後の透水試験や、構造物から直接採取したコアの圧縮強度の結果から評価していたが、これらの手法では、実施した点情報しかわからないこと、多用すると構造物自体に損傷を与える恐れがあり局所的な検証に留まることから、構造物全体がどの程度密実になったかを定量的に把握することが困難であった。そこで、弾性波速度の変化からコンクリート内部の補修効果を非破壊で定量的に把握でき、かつ比較的大きな規模の構造物の健全性評価に適した弾性波トモグラフィ手法を実施して、補修効果の検証を行った⁷⁾。

当補修工事では、図3.3-1に示すようにコンクリート内部のひび割れや空隙にグラウチング材が充填されると、それらによって屈折あるいは回折・散乱し、屈曲していた波線経路が、発信点から受信点までの最短経路へと遷移し、弾性波速度が増加することが期待される。つまり、弾性波速度の増加によって内部の密実性の向上が評価できると考えた。



写真 3.3-1 藻岩発電所取水堰

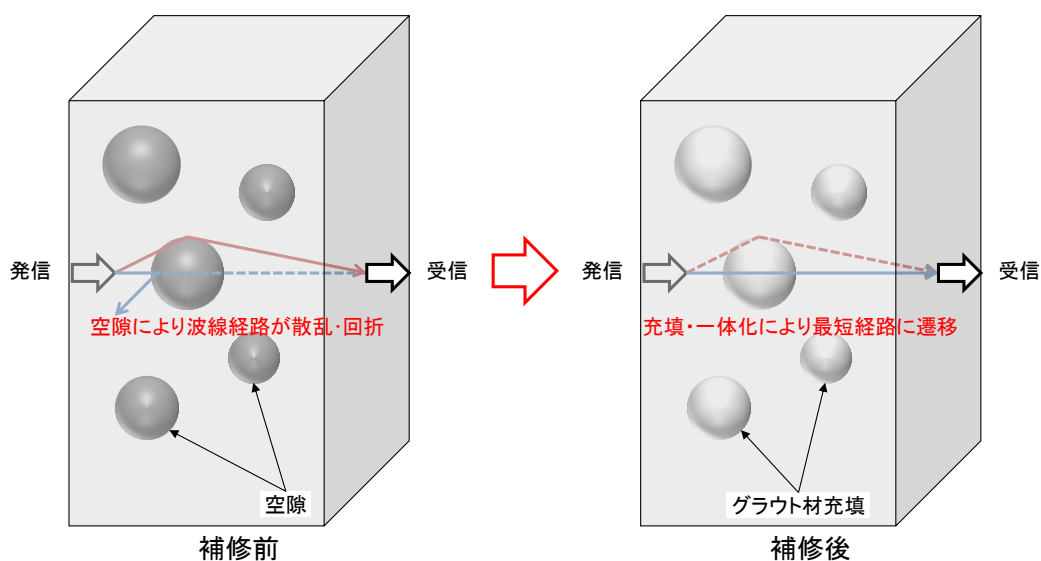


図 3.3-1 弾性波法によるグラウティング材充填の評価

3.3.3 補修内容

コアボーリングによるコア採取・透水試験・強度試験などの調査から、取水堰ピアのコンクリート内部にはポーラスな部分が一部確認され、かつ膨潤性を有する粘土鉱物の混入により、透水性および構造体の安定性に影響を与えていると推察された。取水堰ピアの表面からの雨水の浸入を防止することを目的とし、コンクリート表面のひび割れ補修および表面保護を実施した。また、取水堰ピアのコンクリート内部に対しては、骨材とモルタル部との間隙を埋めてコンクリートの密実性の向上を図るとともに、水の浸透による粘土鉱物

の膨張や凍結融解を防止するために、グラウチングを実施した。グラウチング材料は、微細なひび割れに注入が可能で、材料の取り扱いや施工が容易である無機系超微粒子セメントを使用した。このセメントは、高炉スラグの超微粒子（平均 2.8 μm ）を主材としたもので、ひび割れに注入するとコンクリートから溶け出したカルシウムイオンとスラグが反応し、緻密な硬化体を形成してコンクリート構造物と一体化するものである。

グラウチングは、取水堰ピアの天端からの鉛直孔（ $\phi 50\text{ mm}$ 、 $L=14\text{ m/本}$ ）と、ピアの左右岸側壁面からの水平孔（ $\phi 20\text{ mm}$ 、 $L=0.5\sim 1.0\text{ m/本}$ ）において実施した。グラウチング材の注入方法は、先行して C（セメント）:W（水）=2:1 の配合を注入し、次に C:W=1:1 の配合に切り替え、最大注入圧力を 0.15 MPa として 5 分間注入の状態を保持して注入完了とするものである。平成 19 年度に実施した No.3 ピアの補修概要（施工数量）を表 3.3-1 に、グラウチングの注入孔の配置を図 3.3-2 にそれぞれ示す。水平孔は鉛直に 2 m 間隔で 6 本、1 m 離れた位置に千鳥配置で同様に 6 本配置しており、平均すると 4 m^2 を 1 孔の水平孔でグラウチングすることになる。内部コンクリートへの水分の供給を遮蔽することが主目的の補修であり、密度および水平孔深さ（0.5 m～1.0 m）からもわかるとおり、全体的な補修をしているものではないため、補修効果については局所的な改良効果に留まることが予測される。

表 3.3-1 補修概要（施工数量）

工種	仕様	数量	備考
グラウチング工	鉛直孔 $\phi 50\text{ mm}$	71 m	5 孔
	水平孔 $\phi 20\text{ mm}$	208 m	210 孔
クラック注入工	幅 0.2 mm 以上	737 m	コンクリート改質材 超微粒子セメント
クラック塗布工	幅 0.2 mm 未満	241 m	コンクリート改質補助材
表面保護工	素地調整 4 層塗	569 m^2	特殊変性シリコン樹脂

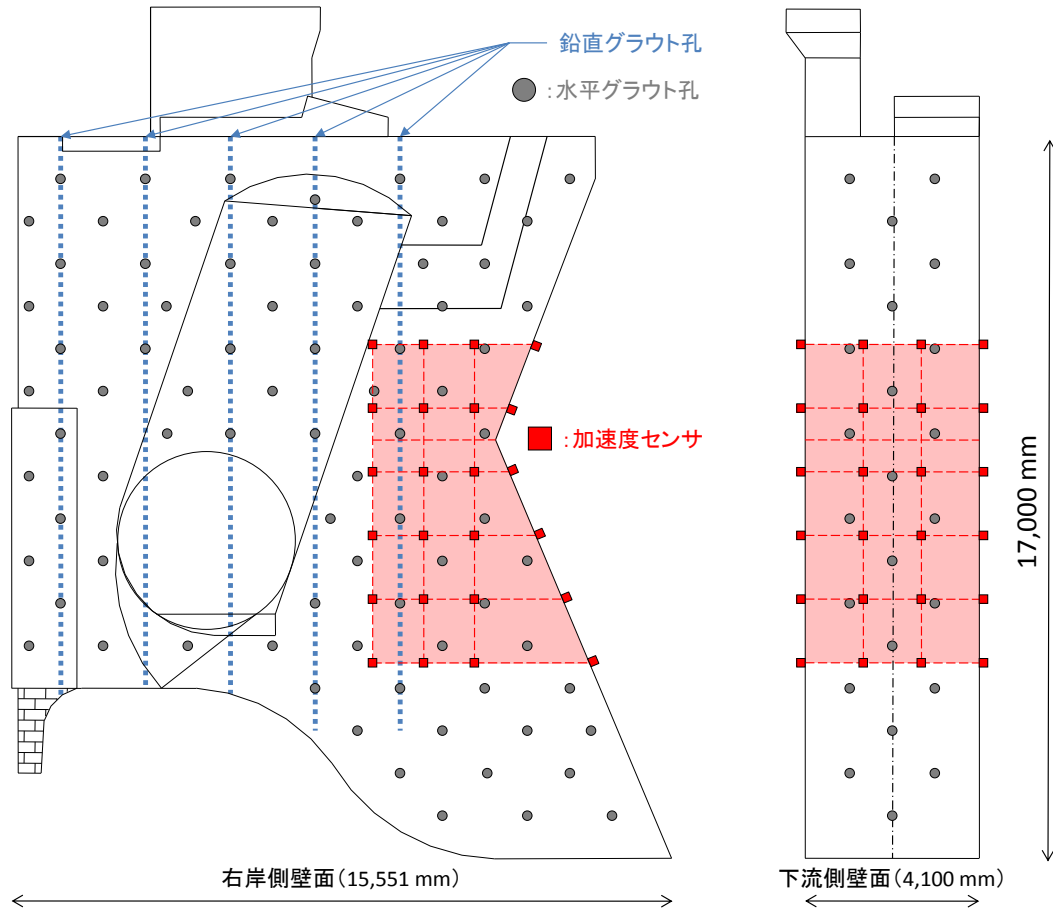


図 3.3-2 グラウチング孔配置図（網掛け部：弾性波トモグラフィ対象範囲）

3.3.4 適用方法

No. 3 ピアにおけるセンサ配置を図 3.3-3 に示す。当該ピアでは内部に存在する損傷の 3 次元的な分布を確認し、かつ包括的に補修効果を確認するために 3 次元要素分割モデルによる弾性波トモグラフィ手法を適用した。事前の測定により 10 m 程度まで弾性波が測定可能であることを確認し、発信点-受信点間距離の最長が 10m 未満となるよう、計測範囲を設定した。設定した計測範囲は、高さ 7.5 m (折れ点より上方向に 2.25 m, 下方向に 5.25 m)、幅 4.1 m、ならびに、奥行きは 5.11 m (最大) とした。左右側壁面は、上流側より 1.2 m 間隔で 3 列にセンサを配置した。各列については高さ 1.5 m 間隔で 6 個配置している。また、下流側壁面には、幅 4.1 m の 3 等分線となる 2 列にセンサを 6 個ずつ高さ 1.5 m 間隔で配置した。配置したセンサ数は 48 個である。なお、この配置による最長の発信点-受信点間距離は 9.7 m である。

コンクリートへの弾性波の発信は、振動ハンマドリル（先端曲率半径 30 mm）によって行った。また、計測に用いたセンサは圧電型加速度センサ（SAF51、富士セラミックス社製、共振周波数 45 kHz、周波数範囲 5~10 kHz）である。これらを写真 3.3-2、写真 3.3-3 に示す。データ収録はレコーダ（GX1、TEAC 社製）を用い、サンプリング周波数は 100 kHz で行った。写真 3.3-4 に、弾性波計測システムを示す。

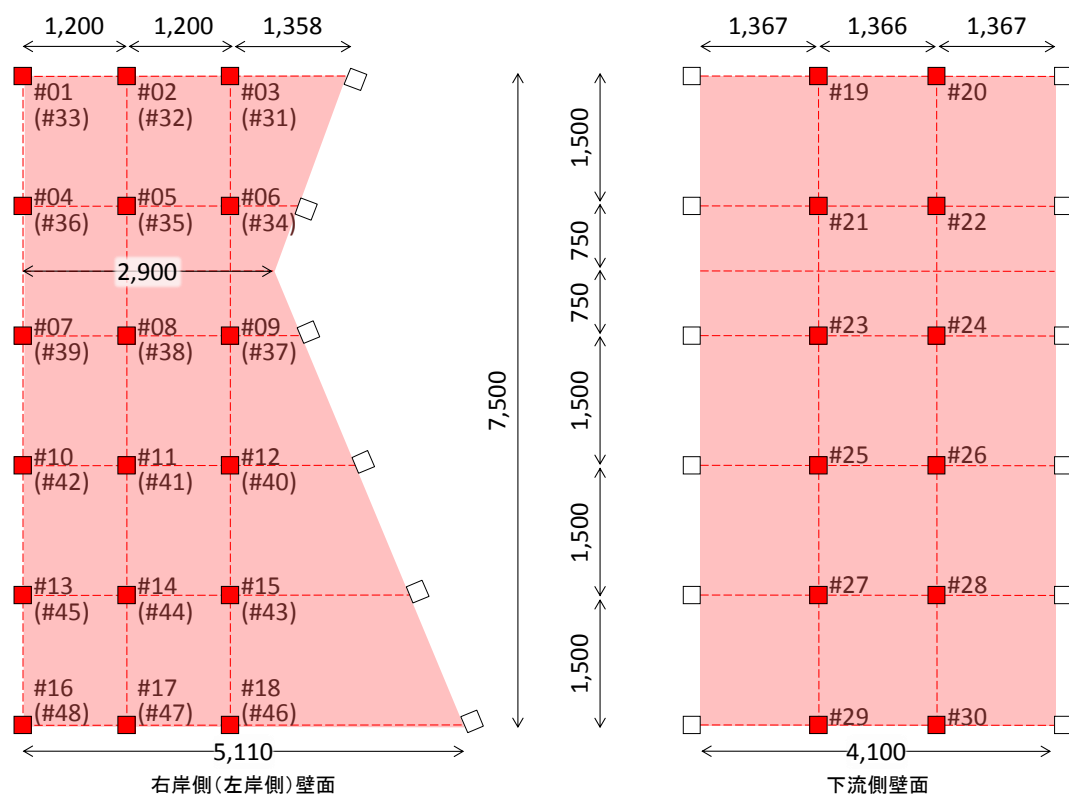


図 3.3-3 弾性波（走時）トモグラフィ計測におけるセンサ配置



写真 3.3-2 振動ハンマドリル



写真 3.3-3 圧電型加速度センサ



写真 3.3-4 弾性波計測システム

図 3.3-4 に計測領域の要素分割モデルおよび走査線（発信点から受信点までの直線経路）の分布を示す。要素分割モデル（解析モデル）は六面体要素に分割し、要素数は 52 個である。また、右岸側および左岸側の走査線数はそれぞれ、発信点 $18 \times$ 受信点 $30 = 540$ 本、下流側発信による走査線数は発信点 $12 \times$ 受信点 $36 = 432$ 本であり、モデル全体の合計では 1,512 本となる。それぞれの走査線における走時を基に解析を行う。

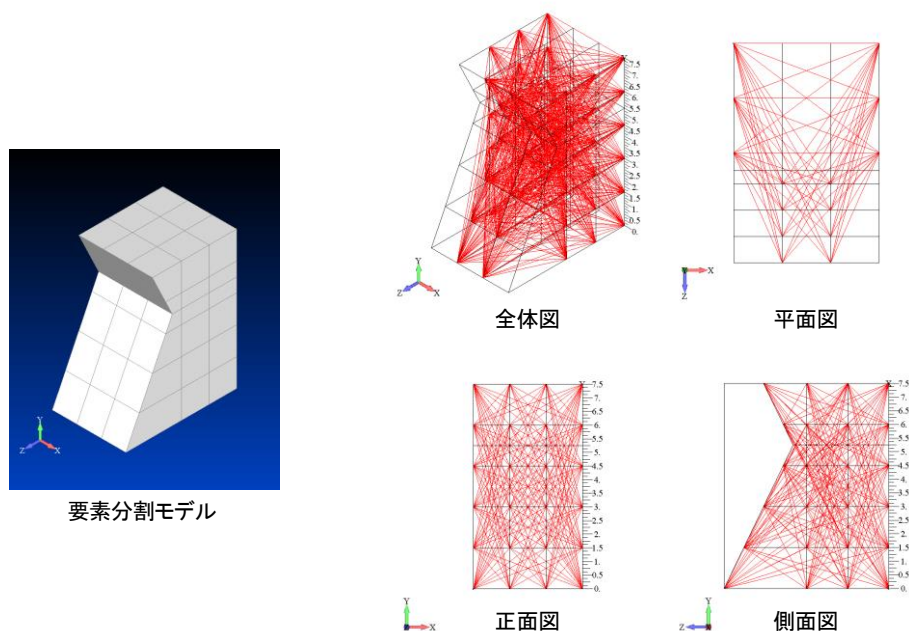


図 3.3-4 3次元要素分割モデルおよび走査線分布

右岸側に設置するセンサの近傍で弾性波を発信した場合、発信点の近傍のセンサで得られる波形を発信点波形、下流側と左岸側の計 30 個のセンサで得られる波形を受信点波形とし、図 3.3-5 に示すように、各走査

線における発信点波形と受信点波形との初動走時を読み取る。このとき、図 3.3-6 に示すように、ノイズによる初動の読み取り誤差を低減させるため、振動ハンマドリルによる発信を約 10 秒間継続し、得られた約 300 個の波形の重合（スタッキング⁸⁾）平均波形とすることで、読み取り誤差を低減し初動を読み取った。

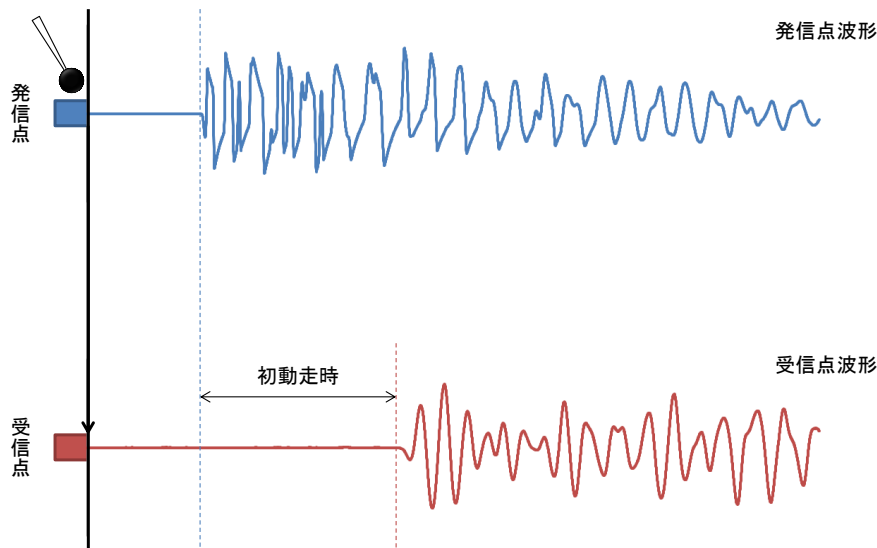


図 3.3-5 初動走時の読み取り

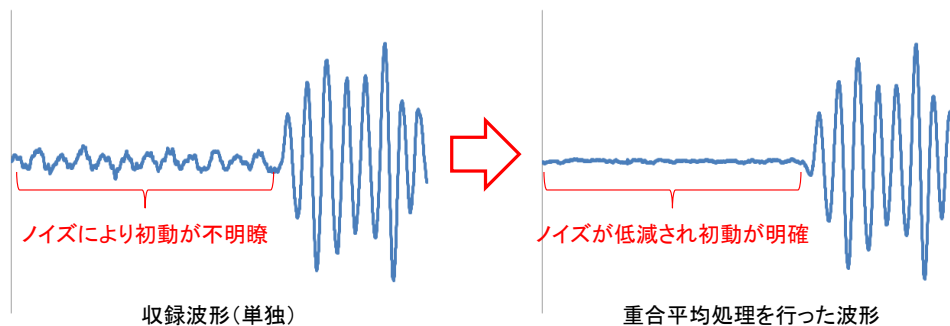


図 3.3-6 波形の重合平均処理による読み取り誤差の低減

3.3.5 適用結果と考察

(1) 受信点波形の分析による評価

補修前において測定された受信点波形の一例を図 3.3-7、および、図 3.3-8 に示す。横軸は時間（秒）、縦軸は振幅（電圧）であり、縦軸の最大振幅は波形ごとに設定している。また、波形にはそれぞれ発信時刻、およびトモグラフィ解析に用いた初動走時を示す。図 3.3-7 は、右岸側壁面の対象領域の上流側上端に配置されたセンサ#01 の近傍において打撃発信を行った際の、センサ#01 と同じ高さの断面に配置されたセンサ#33、#32、#31、#20、ならびに、#19 での測定波形である。図 3.3-8 は、右岸側壁面の対象領域の上流側下端に配置されたセンサ#16 の近傍において打撃発信を行った際の、センサ#16 と同じ高さの断面に配置されたセンサ#48、#47、#46、#30、ならびに、#29 での測定波形である。

上端断面（図 3.3-7）において、センサ#33 および#32 での測定波形は、他の波形に比べ、継続時間が長く、かつ S/N 比（信号に対するノイズの比率）も小さい。到達時間についても、上端断面において最も走査線が

長く、最も初動走時が長いはずのセンサ#31より、センサ#33、および、センサ#32の初動走時は長くなっている。特に、センサ#33での測定波形は、走査線5本中2番目に走査線の長さが短いにも関わらず初動走時が最も長い。このことから上端断面においては、損傷があり、特に上流側の損傷が大きいことが推察される。

一方、下端断面（図 3.3-8）における測定波形は、上端断面と異なりほぼ同様の傾向となっている。このことから、下端断面全体で損傷度は同様であることが推察される。

補修前の結果に対して、補修後において測定された受信点波形の一例を図 3.3-9, および図 3.3-10 に示す。

上端断面（図 3.3-9）において、センサ#33での測定波形における初動走時は、補修前の初動走時（図中、黒色破線）よりも短くなっている。このことから、補修により損傷が改善されたことが推察される。一方、その他のセンサの測定波形では、初動走時に補修前からの顕著な変化は確認されておらず、局所的な損傷に対する改善となっているものと推察される。

一方、下端断面（図 3.3-10）におけるセンサで測定された波形は、全て初動走時が補修前と比べ短くなったことが確認された。このことから、下端側においては全体的な損傷に対する改善となっているものと推察される。

このように、従来の弾性波法による評価であっても、構造物のあらゆる位置において行い、多数かつ多方向の走査線の情報を分析することで、大まかな内部の健全性評価や損傷位置・分布の推察が可能である。ただし、損傷領域の定量評価や損傷度合の定量評価は困難と言える。

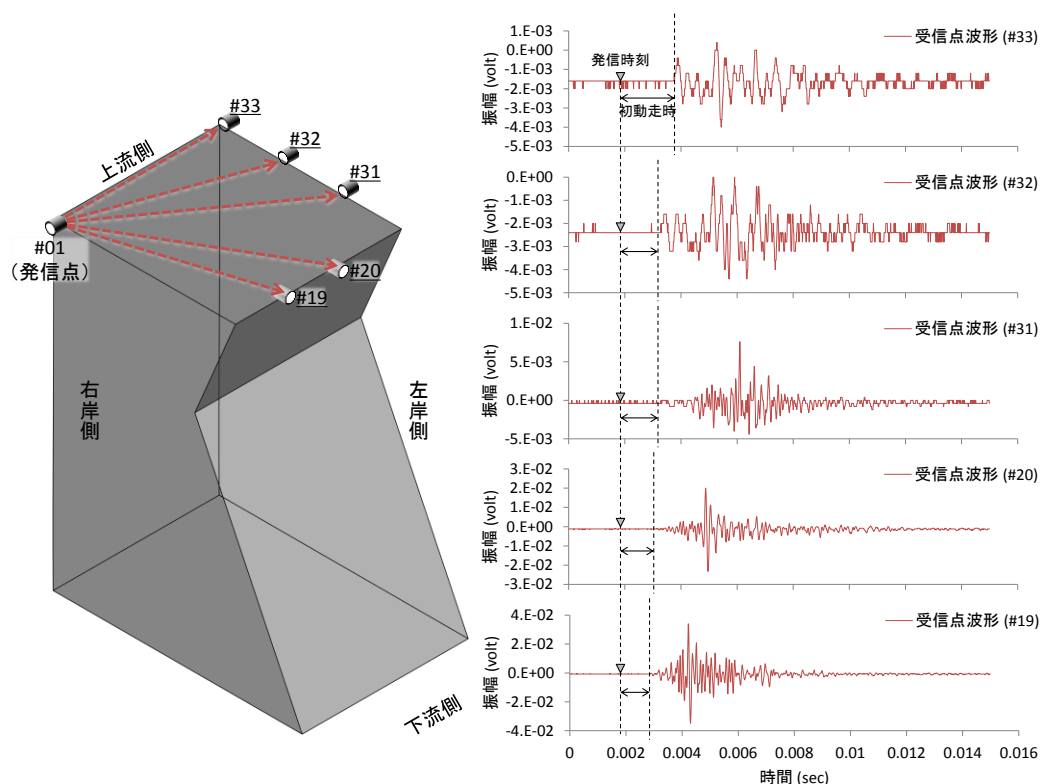


図 3.3-7 補修前の受信点波形（対象領域の上端断面）

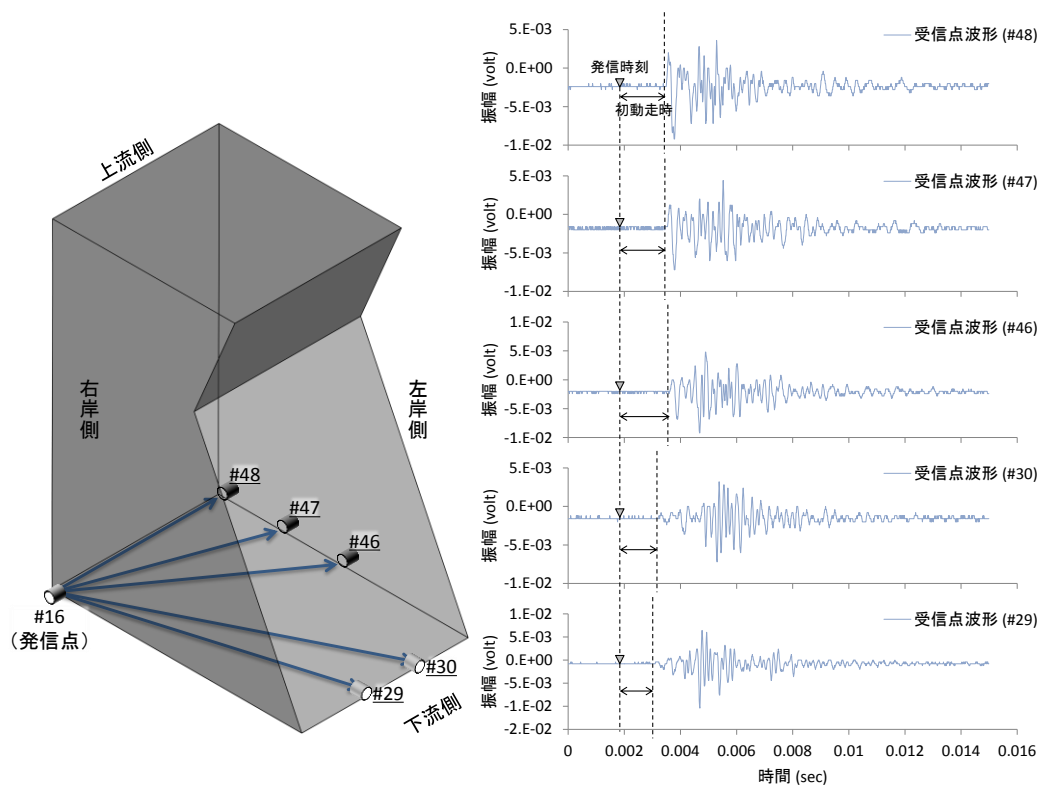


図 3.3-8 補修前の受信点波形（対象領域の下端断面）

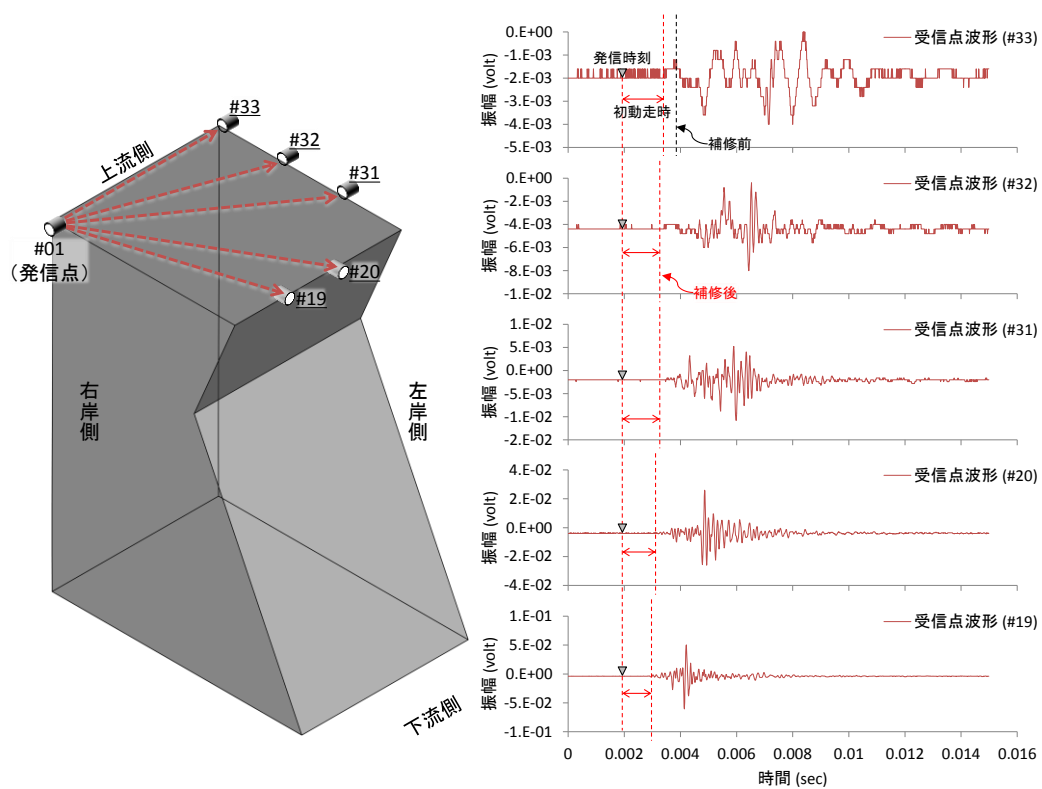


図 3.3-9 補修後の受信点波形（対象領域の上端断面）

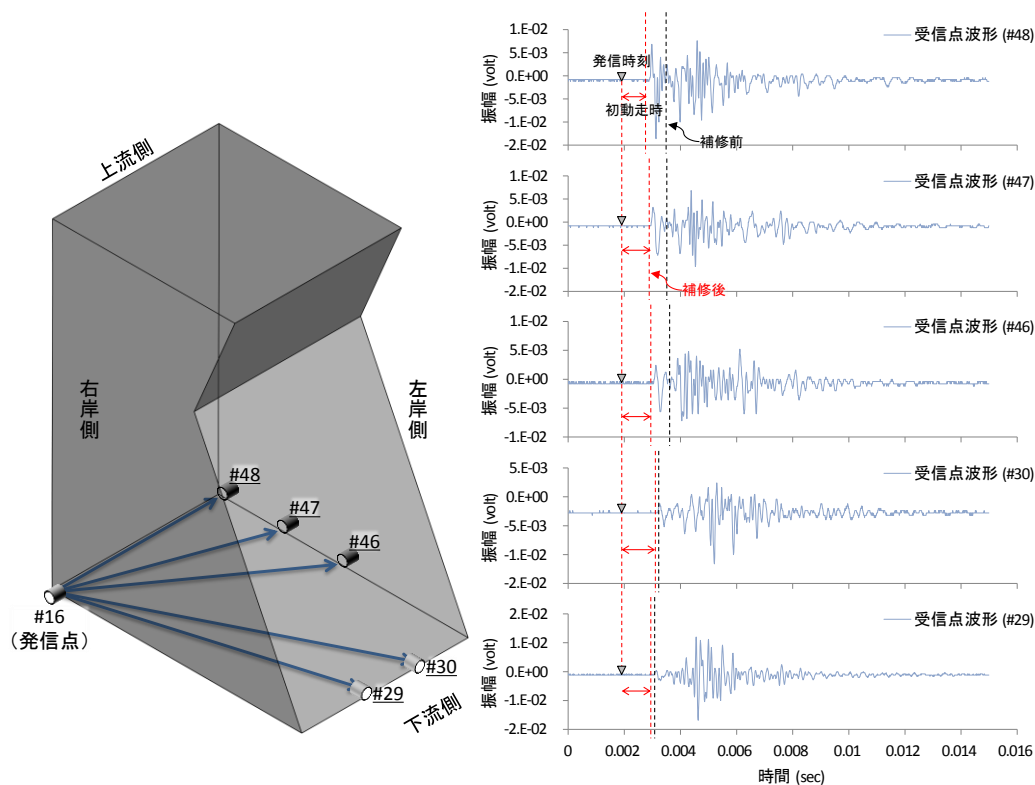


図 3.3-10 補修後の受信点波形（対象領域の下端断面）

(2) 弾性波トモグラフィ手法による評価

補修前後における弾性波速度の3次元分布（コンター）画像を、それぞれ、図 3.3-11、および、図 3.3-12 に示す。また、3次元コンター画像から切り出したダム軸方向および上下流方向の断面における弾性波速度の2次元コンター画像を、それぞれ、図 3.3-13、図 3.3-14 ならびに、図 3.3-15 に示す。図中、弾性波速度について、4,000 m/s 以上を濃青色、2,000 m/s 以下を赤色として色の変化で表している。

これらの図より、補修前は、計測範囲の上流側から左岸側に緑色で示される 3,000 m/s 程度の低速度領域が分布している。左右岸で比較すると、左岸側の弾性波速度が低く、緑色（3,000 m/s）から赤色（2,000 m/s）で示されており、より多くの損傷（ひび割れや空隙）が存在していたと考えられる。2次元コンター画像からは、ピア内部にも緑色の 3,000 m/s 以下の低速度領域が分布していることが確認され、上流側から左岸側に分布していた緑色から赤色の低速度領域は、内部まで広がっている。

一方、補修後は、全体的に濃青色の 4,000 m/s 以上の領域が拡大し、弾性波速度が大幅に上昇していることが確認された。補修前において顕著であった左岸側の低速度領域が縮小し、3,500～4,000 m/s の速度領域が拡大していた。また、ピア内部においても、上流側から左岸側にかけて確認された低速度領域が著しく縮小していた。補修前後の弾性波速度画像の変化より、補修後はグラウチングにより内部のひび割れや空隙が密実に充填されたものと考えられる。

グラウチングは構造体内部を含めた全体的に実施したものではない（平均：4 m²/孔）ため、グラウチングによる補修効果が十分現れていない領域も見られるが、本手法を用いることで、3次元空間内の損傷領域および、その損傷度合を弾性波速度から、定量的に評価することが可能であった。

なお、図 3.3-15 に示す断面は、既往の弾性波トモグラフィ手法では、要素分割モデルが正方形の2次元平

面に限定されていたことからセンサが配置できず、弾性波法による直接的な情報が得られない断面である。このような断面に対しても、提案手法を用いることで、既往の手法では得ることのできない断面も含め、健全性を評価したい任意の断面を抽出して、補修効果を効率的かつ包括的に把握することが可能であった。

このように、弾性波トモグラフィ手法を用いた計測によって補修効果が全体的な速度増加として確認されている。一方、Shiotani, T. and D. G. Aggelis は、別のピア構造物に対して、グラウト材の強度が十分に発現されていない時点（補修後2週間）において同手法を適用している。そこでは、構造物の劣化状況や補修時の初期養生の対処状況（冬期の強度発現時の熱供給不足）によっては、補修後の弾性波速度は増加せず、低下する場合もあるという、同手法の適用において留意すべき重要な結果を報告⁹⁾している。これに関しては、その2年後（グラウト材の強度が十分に発現された後）に同位置にて再実施した計測時において、速度低下量（補修後2週間）から推定したグラウティング量を用いて、硬化後（2年後）の速度増加量を予測したが、それに合致した計測結果が得られている¹⁰⁾。つまり、補修後の測定時期によっては弾性波速度が低下する場合もあったが、長期的には弾性波速度は上昇する（補修効果があった）ことを示している。

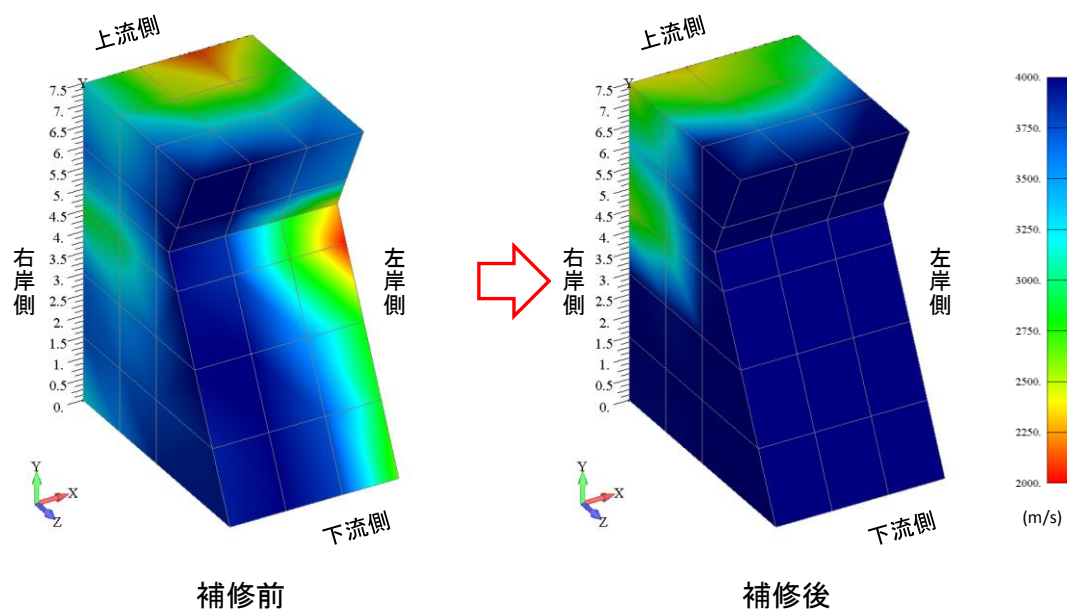


図 3.3-11 弾性波速度コンター画像（右岸—下流側）

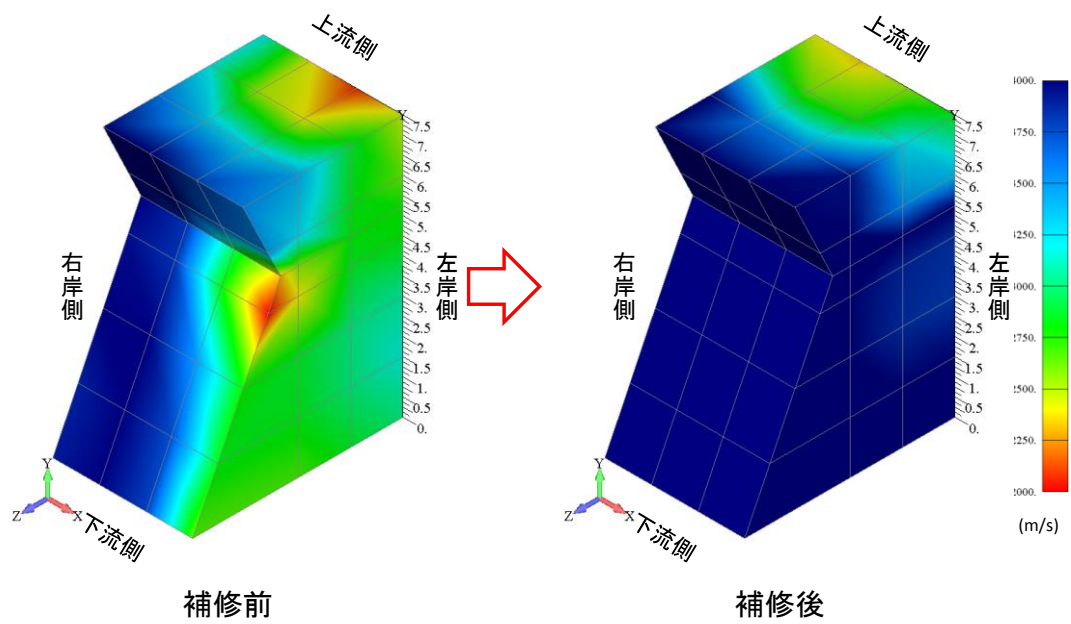


図 3.3-12 弾性波速度コンター画像（下流－左岸側）

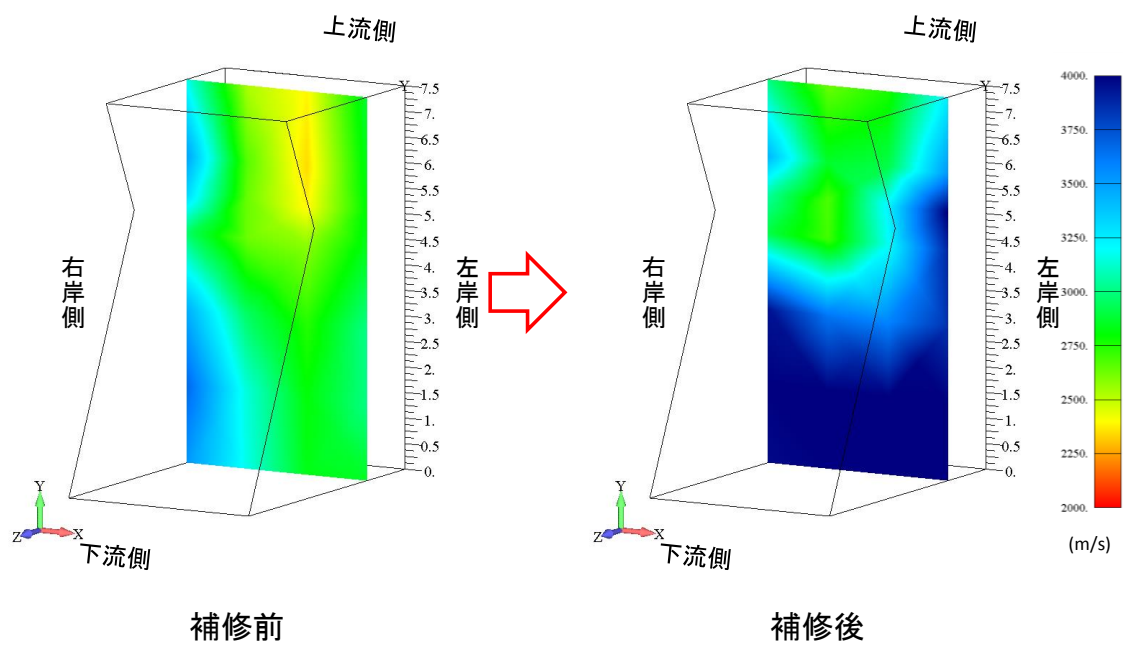


図 3.3-13 弾性波速度コンター画像（上流側断面）

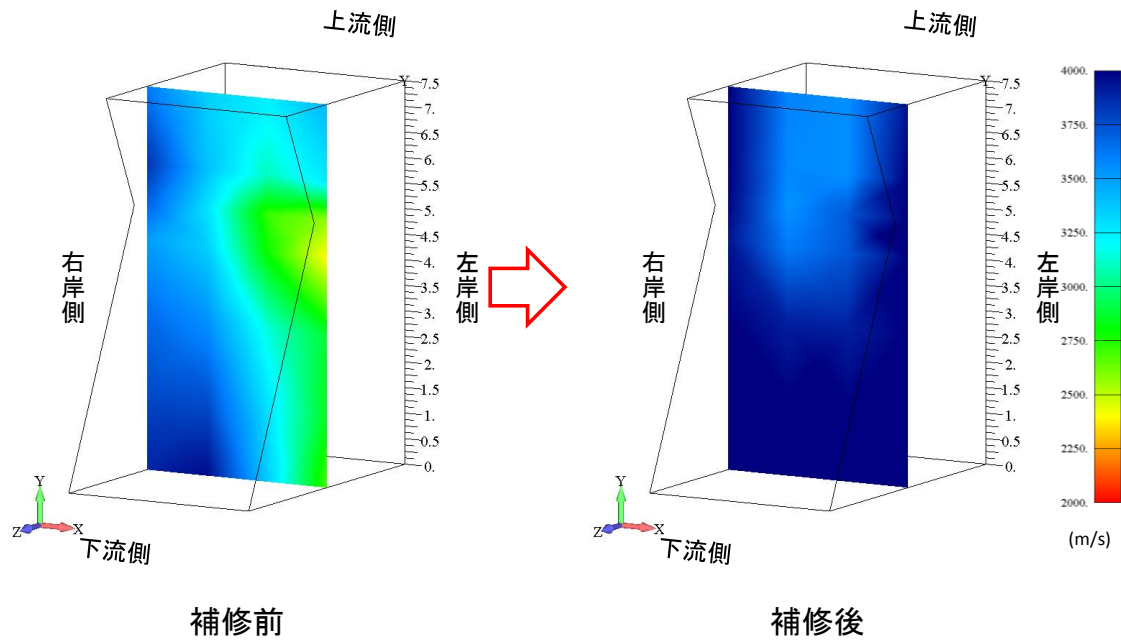


図 3. 3-14 弾性波速度コンター画像（下流側断面）

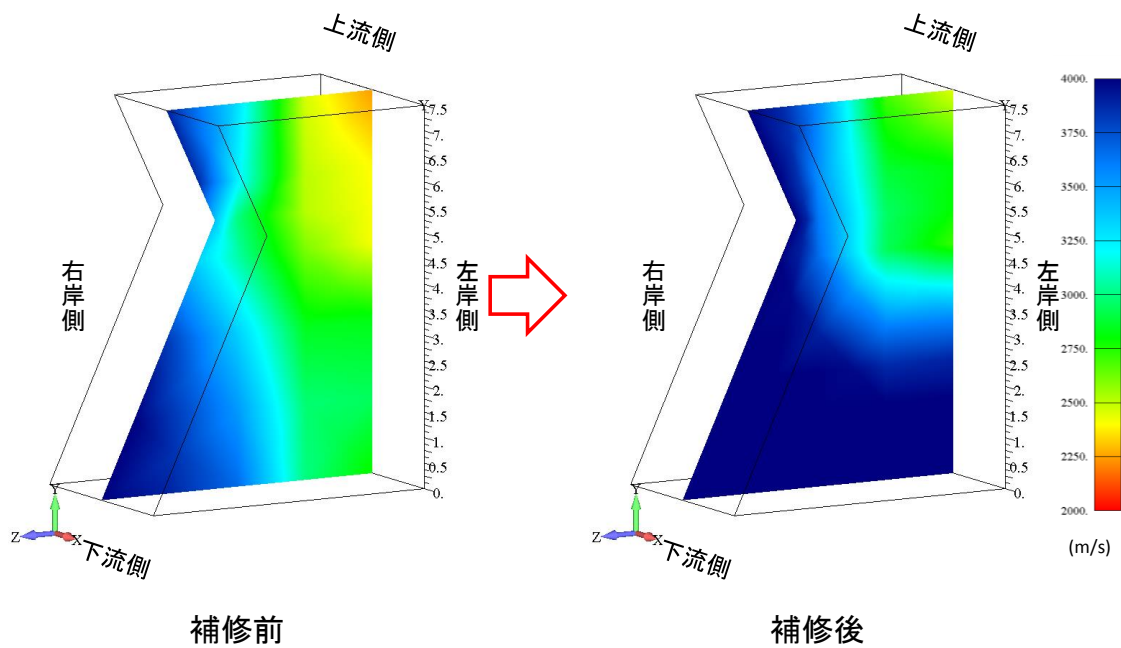


図 3. 3-15 弾性波速度コンター画像（上下流断面）

(3) 採取したコアの観察による評価

弾性波トモグラフィ手法を適用した範囲において、補修前後にそれぞれコア採取を行い、観察による評価も試みた。コアは直径 10 cm、長さ 50 cm を目標としてコアボーリングマシンにより採取した。補修前および補修後に採取したコアの一例を写真 3. 3-5 および写真 3. 3-6 にそれぞれ示す。



写真 3.3-5 採取コア（補修前）



写真 3.3-6 採取コア（補修後）

採取したコアは、補修前および補修後ともに、表面から約 20 cm 付近において破断が確認された。当該構造物の補修履歴によれば、過去にコンクリートによる増厚を実施しており、破断部は新旧コンクリートの界面であると考えられる。補修前後における内部の旧コンクリートを観察すると、両者ともに破砕が著しく、補修による効果が確認できるとは言い難い。しかし、破砕したコンクリート塊を観察すると、写真 3.3-7 に示すように、補修後のコンクリート塊の界面にはグラウト材が確認された。破断や破砕の状況が補修前後において同じ傾向であったことは、コア採取時、充填されたグラウト材は、コアボーリングマシンの回転力にもなう衝撃に耐えうる保持力ではなかったためと考えられる。



写真 3.3-7 破砕したコンクリート塊で確認されたグラウト材

また、補修前後それぞれの、比較的大きなコンクリート塊に対し、蛍光エポキシ樹脂を真空圧入し、切断して紫外線を照射し、輝度の違いによる状態の確認も行った。紫外線照射により得られた画像を写真 3.3-8 および写真 3.3-9 に示す。補修前における内部の旧コンクリート断面では、多くの微細な脈状のひび割れが確認された。これに対し、補修後における内部の旧コンクリート断面ではひび割れがほとんど確認されなかった。このことから、補修が機能したと考えることもできるが、コアは同位置での採取はできないため、補修後のコアで確認された状態が、補修前からその状態であった可能性も否定できない。

採取したコアの観察による評価では、局所的な評価に留まり全体像の把握は難しく、かつ補修前後において同位置で比較することが不可能であり、補修による効果を適切に確認することは困難である。一方で、採取したコアは、その場所における実態を示す最も信頼度の高い重要な資料であることは事実である。そこで、

まず、弾性波トモグラフィ手法のような構造物全体を把握する非破壊検査手法によりスクリーニングを行う。さらに、その全体領域の中で速度の低い領域に絞り込んだ場所でコアボーリングを行い、コアの性状を目視確認するとともに、強度試験等を実施することで、より一層合理的な評価が可能になると考えられる。

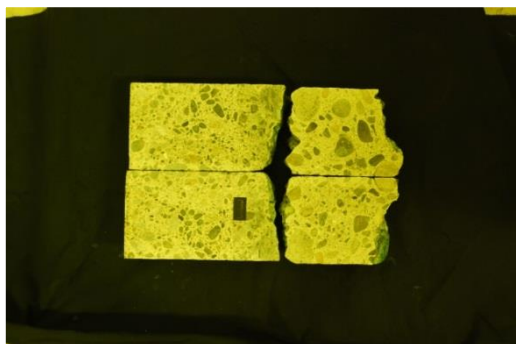


写真 3.3-8 紫外線照射画像（補修前）

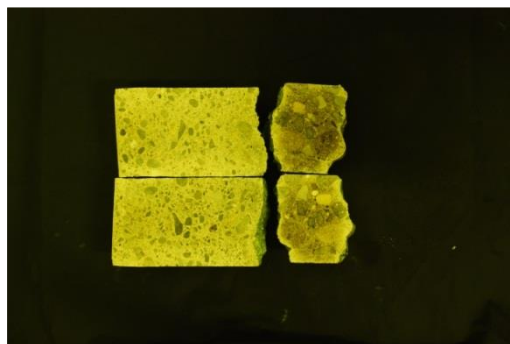


写真 3.3-9 紫外線照射画像（補修後）

3.3.6 補修効果の定量評価へのアプローチ

本手法で得られた各要素の弾性波速度の度数分布を図 3.3-16 に示す。図中、横軸は、弾性波速度、縦軸は要素数であり、補修前および補修後に分けて示している。補修後の弾性波速度は補修前に比べ、3,000 m/s 未満の要素数が減少し、4,000 m/s 前後の要素数が大幅に増加していることがわかる。全要素の平均値として、補修前が 3,105 m/s、補修後が 3,737 m/s であり、その差は 632 m/s であった。

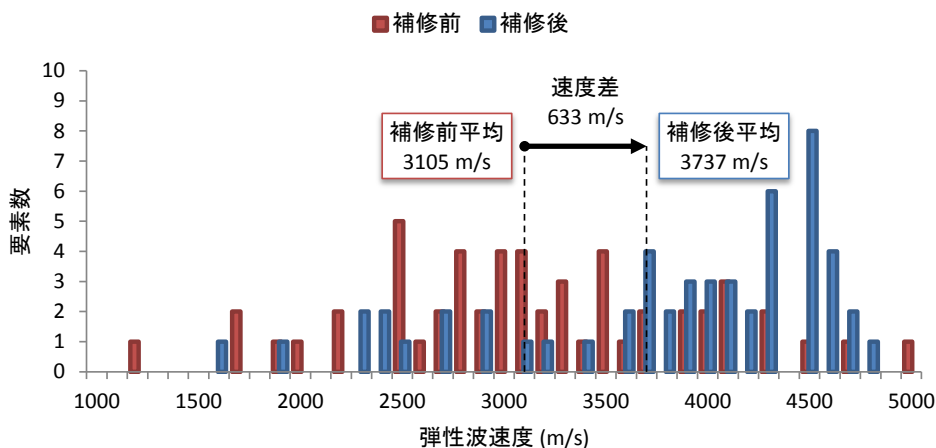


図 3.3-16 補修前後における弾性波速度の度数分布

弾性波速度が上昇していることにより、当該ピアはグラウチングにより密実性が向上していると考えられるが、どれほど密実性が向上されたかを弾性波速度を用いて定量的に表すことは困難である。

そこで、弾性波速度に関係のある力学的物性値のうちヤング係数に着目し、弾性波速度の上昇量から、ヤング係数を推定することで健全性を定量的に評価することを目的に、数値解析シミュレーションを行った。以下、数値解析モデルおよび検証結果を示す。

(1) 複合材料の均質化モデリング

コンクリート構造体は、骨材、セメント、空気、および水などから構成される。このことからコンクリートを複合材料として扱う手法が研究されている¹¹⁾。そこで、当該ピアのコンクリートを図 3.3-17 に示すように内部に存在するひび割れや空隙と、それ以外（以下、母材コンクリート）との複合材料として定義する。

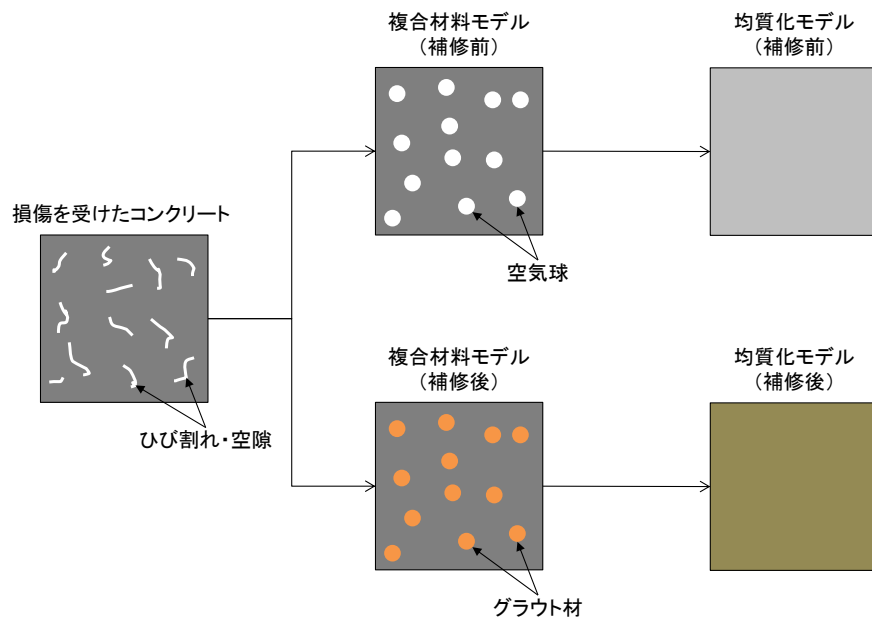


図 3.3-17 損傷したコンクリートの均質化モデル

波動が球状の空隙（以下、空気球）に衝突するとあらゆる方向に散乱する。このように、空気球が散乱子となるときの波動方程式の解は、2つの未知の散乱係数 A_n 、 B_n を有する球ベッセル関数と球面調和関数の級数展開から成る¹²⁾。Ying and Truell が示す応力関係¹³⁾より、この散乱係数 A_n 、 B_n は、2つの連立代数方程式を用いて得ることができる。式(3.3-4)に行列形式で示す。

$$\begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_n \\ B_n \end{pmatrix} = \frac{-1}{k_p} (-i)^{n+1} (2n+1) \begin{pmatrix} J_{11} \\ J_{21} \end{pmatrix} \quad (3.3-1)$$

ただし、

$$H_{11} = -\left(n^2 - n - \frac{(k_s a)^2}{2}\right) h_n(k_p a) - 2(k_p a) h_{n+1}(k_p a),$$

$$H_{12} = n(n+1)[(n-1)h_n(k_s a) - (k_s a)h_{n+1}(k_s a)],$$

$$\begin{aligned}
H_{21} &= (n-1)h_n(k_p a) - (k_p a)h_{n+1}(k_p a), \\
H_{22} &= -\left(n^2 - 1 - \frac{(k_s a)^2}{2}\right)h_n(k_s a) - (k_s a)h_{n+1}(k_s a), \\
J_{11} &= -\left(n^2 - n - \frac{(k_s a)^2}{2}\right)j_n(k_p a) - 2(k_p a)j_{n+1}(k_p a), \\
J_{21} &= (n-1)j_n(k_p a) - (k_p a)j_{n+1}(k_p a),
\end{aligned}$$

ここで、 i は虚数 ($i^2 = -1$)、 k_p および k_s は、縦波 (P 波) および横波 (S 波) の波数であり、角周波数をそれぞれの速度で除すことで求められる。 a は空気球の半径、 $h_n(x)$ および $j_n(x)$ は、変数 x の n 次の球ハンケル関数 (または、第3種球ベッセル関数) および第1種球ベッセル関数である。散乱係数 A_n より、前進波および後方散乱波の振幅 $f(0)$ 、 $f(\pi)$ を式(3.3-2)にて求めることができる。

$$\begin{aligned}
f(0) &= \frac{1}{ik_p} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)A_n \\
f(\pi) &= \frac{1}{ik_p} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1)A_n
\end{aligned} \tag{3.3-2}$$

なお、式(3.3-2)における次数 n は、 $k_p \cdot a$ と等しい値を用いる¹⁴⁾。さらに、Waterman et al.は、式(3.3-3)を用いることで母材と空気球の均質化モデルにおける波数 k を求めることができるとしている¹⁵⁾。

$$\left(\frac{k}{k_p}\right)^2 = 1 + \frac{3\varphi}{k_p^2 a^3} f(0) + \frac{9\varphi^2}{4k_p^4 a^6} [f^2(0) - f^2(\pi)] \tag{3.3-3}$$

ここで、 φ は空気球の体積当たりの混入率である。また、発信する弾性波の角周波数 ω が既知であれば、角周波数 ω において式で求められた波数 $k(\omega)$ と、弾性波速度 $c(\omega)$ および減衰係数 $\alpha(\omega)$ の間には、式(3.3-4)のような関係が成り立つ¹⁴⁾。

$$k(\omega) = \frac{\omega}{c(\omega)} + i \alpha(\omega) \tag{3.3-4}$$

式(3.3-4)により求められる波数 k は複素数であり、虚数部の係数が減衰係数に相当する。したがって、求められた均質化モデルにおける波数 k の実数部と、角周波数 ω を用いて、式(3.3-4)より均質化モデル、つまりは体積当たりの混入率 φ の空気球を含む媒質における弾性波速度を求めることができる。

本研究では、ひび割れや空隙を空気球とした補修前 (損傷) モデルと、空気球が全てグラウト材により充填された補修後モデルにおいて、式(3.3-3)と式(3.3-4)により求められた弾性波速度が、弾性波トモグラフィ手法により得られた弾性波速度の平均値となるように、母材コンクリートのみかけのヤング係数 E を逆算した。全ての空気球がグラウトで充填されたことを想定していることから、空気球の混入率 φ は、計測範囲におけるグラウチング孔からのグラウト注入量と計測範囲との体積比 0.01 (1.0%) を採用した。また、空気球の半径 a は 50 mm とした。散乱子は損傷として導入した空気球のみとし、骨材、セメント、水、グラウト材、および標準的に含まれる空気量は全て母材コンクリートとして、空気球と母材コンクリートの複合材料

としみなし、補修前後における母材コンクリートのみかけのヤング係数の変化を検証した。

なお、母材コンクリートのポアソン比 ν は0.2、密度 ρ は2,300 g/cm³とした。発信する弾性波の角周波数 ω は、振動ハンマドリルで弾性波を発信した時に直近の加速度センサで計測された発信点波形の周波数応答スペクトルにおける卓越周波数 f (5 kHz) を用いて、 $\omega = 2\pi f$ により求めた。そして、縦波 (P 波)、および横波 (S 波) の弾性波速度 c_p 、 c_s 、および波数 k_p 、 k_s は以下の関係式を用いた。

$$\begin{aligned} c_p &= \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}, & k_p &= \omega/c_p \\ c_s &= \sqrt{\mu/\rho}, & k_s &= \omega/c_s \end{aligned} \quad (3.3-6)$$

ここで、 λ 、および μ はラメ定数 ($\lambda = E\nu/[(1+\nu)(1-2\nu)]$, $\mu = E/2(1+\nu)$) である。均質化モデルにおける諸条件を表 3.3-2 に示す。

表 3.3-2 均質化モデルにおける諸条件

	補修前		補修後		備考
	母材コンクリート (空気球以外)	空気球	母材コンクリート (グラウト材含む)	空気球	
ヤング係数 (GPa)	10-40*	—	10-40*	—	母材コンクリートの みかけのヤング係数
ポアソン比 (-)	0.2	—	0.2	—	—
密度 (g/cm ³)	2,300	—	2,300	—	—
半径 (mm)	—	50.0	—	50.0	—
混入率 (%)	—	1.0	—	0.0	グラウト材注入率 より設定
弾性波速度 (m/s)	3,105		3,737		弾性波トモグラフィ 手法により得られた 弾性波速度の平均値
発信周波数 (kHz)	5				発信点波形の周波数 応答スペクトルに おける卓越周波数

※ヤング係数が未知数であり伝播速度と整合する値を逆算する。

(2) 数値解析結果と考察

弾性波トモグラフィ手法により得られた弾性波速度の平均値と空気混入率に基づき均質化モデルにより算定した、母材コンクリートのみかけのヤング係数の結果を図 3.3-18 に示す。補修前の弾性波トモグラフィ手法により得られた弾性波速度の平均値 3,105 m/s と補修前の空気球の混入率 1%に基づき、均質化モデルにより算定したピアの母材コンクリートのみかけのヤング係数は 20.2 GPa となった。一方、補修後の弾性波トモグラフィ手法により得られた弾性波速度の平均値 3,737 m/s (空気球の混入率 0%)に基づき、算定した当該ピアの母材コンクリートのみかけのヤング係数は 28.9 GPa となった。この結果から、十分に充填されたグラウト材が硬化し、母材と一体化したことにより、ピアの剛性 (みかけのヤング係数) は約 43% 上昇したと考えられる。

ところで、本数値解析においては、グラウト材の注入率を 1%と仮定したが、本計測で得られた速度変化が見込まれる範囲 (つまり補修影響範囲) は、本来グラウティング孔周辺部のみであると考えられるため、補

修影響範囲をまず定めて、その範囲の要素に限定した取り扱いをするべきである。しかし、補修影響範囲を設定するだけのデータがないこと、また、図 3.3-16 に示す補修前後の速度度数分布は、計測範囲の全体要素に対して実施したものであることから、今回は計測範囲を分母としたグラウト注入率 1%を用い、過小評価の可能性はあるが、母材ヤング係数の評価を行うこととした。

ここで、参考値として、補修後の弾性波トモグラフィ手法により得られた弾性波速度の平均値 3,737 m/s に基づき算定した当該ピアの母材コンクリートのみかけのヤング係数 28.9 GPa を、当該ピアの本来のヤング係数であるものとし、母材コンクリートがこのヤング係数でありながら、補修前の弾性波トモグラフィ手法により得られた弾性波速度の平均値 3,105 m/s に低下させる空気球の混入率を、式 (3.3-3) と式 (3.3-4) から求めた。その結果、半径 50 mm の空気球が体積あたり約 38%含まれていたことになる。今回の計測範囲全体の約 38%が空隙であったとは到底想定できないが、補修影響範囲はグラウチング孔の周辺部であると考えると、計算上ではグラウチング孔径の約 1.5 倍に相当する領域が、全て空気からグラウト材に置換されたことになる。なお、この場合のグラウト注入量は、計測範囲全体に対し 0.2%程度である。

本項では、均質化モデルを用いた数値解析により、弾性波速度の上昇量から、力学的物性値であるヤング係数を求めることができ、コンクリートの健全性の定量的評価につながる可能性を示した。ただし、当該ピアの内部に存在するひび割れや、空隙の形状および規模、補修影響範囲の詳細が定かではない状況において、この均質化モデルによる評価が適用可能であるか、ひび割れや空隙の大きさ、または適用する波長などをさらに検証する必要がある。

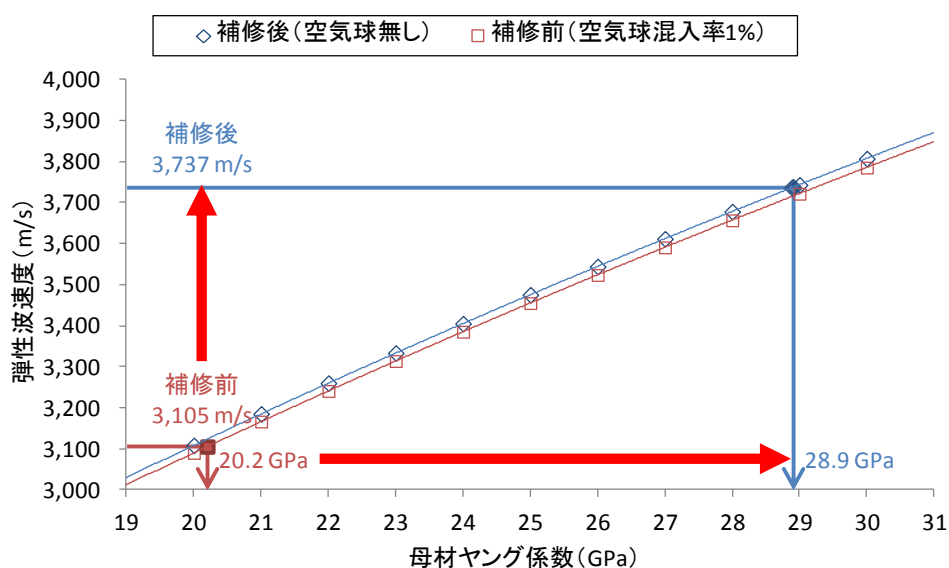


図 3.3-18 速度上昇量と母材ヤング係数の関係

3.4 まとめ

本章では、「実構造物への適用」の課題を検討した。現状の弾性波トモグラフィ手法では、適用対象断面が 2 次元断面に限定されていたが、有限要素法を応用した任意の 3 次元形状に対応可能な波線追跡法を提案し、この課題を解決し、実構造物への適用結果から提案手法の有効性を実証した。本章における結論を以下に示す。

- (1) 要素分割モデルとして正方形の2次元平面モデルに限定されていた従来の波線追跡法に対して、三角形、四面体および六面体要素にも対応でき3次元空間モデルに拡張可能な非制限波線追跡法を提案した。
- (2) 提案した非制限波線追跡法を弾性波トモグラフィ手法に用いることにより、センサ位置やモデル化に制約されない、3次元形状をもつ実構造物に対しても適用可能な弾性波トモグラフィ手法を開発した。
- (3) 弾性波トモグラフィ手法による解析結果に基づき、複合材料の均質化モデルを用いた数値解析より、ヤング係数を指標として用いて構造物の補修前後の健全性を定量的に評価する可能性を示した。
- (4) 開発した弾性波トモグラフィ手法を用いた現場検証によって、大規模なコンクリート構造物の損傷規模や分布の視覚的把握、さらには補修による効果の検証を、従来の2次元弾性波トモグラフィ手法より全体的かつ効率的に行うことが可能であることを示した。

今後さらに増え続ける老朽化コンクリート構造物の包括的な維持管理において、非制限波線追跡法を適用した3次元弾性波トモグラフィ手法は有効と考えられる。当手法の実証によりデータを蓄積し、得られた速度画像と対象コンクリート構造物の実態とを合わせてデータベース化することで、本研究におけるヤング係数のように、物理的指標に関連付けた定量的な健全性評価も可能になると考えられる。

第3章の参考文献

- 1) 佐々宏一，芦田譲，菅野強：物理探査，森北出版，pp.117-127，1993.
- 2) 桃木昌平，蔡華堅，塩谷智基，小林義和，宮永孝志：三次元弾性波トモグラフィによるコンクリート構造物の健全性評価，構造工学論文集，Vol. 57A, pp. 959-966, 2011.
- 3) Y. Kobayashi, T. Shiotani, D. G. Aggelis and H. Shiojiri: Three-Dimensional Seismic Tomography for Existing Concrete Structures, Proceedings of Second International Operational Analysis Conference, Vol. 2, pp. 595-600, 2007.
- 4) Momoki, S., T. Shiotani, H. K. Chai, D. G. Aggelis and Y. Kobayashi: Large-scale evaluation of concrete repair by three-dimensional elastic-wave based visualization technique, Structural Health and Monitoring, Vol 12(3), pp. 240-251, 2013.
- 5) 塩谷智基，D. G. Aggelis，桃木昌平：弾性波トモグラフィによるコンクリート構造物の健全性評価技術，とびしま技報 No. 56, pp. 111-116, 2007.
- 6) 若松洋介，松山俊明，塩谷智基：老朽化コンクリート構造物における補修改良効果の検証，電力土木 No. 330, pp. 27-30, 2007.
- 7) 宮永孝志，畔木寛仁，桃木昌平：三次元弾性波トモグラフィによるコンクリート構造物の補修改良効果の検証，電力土木 No. 345, pp. 16-20, 2010.
- 8) 志賀正臣，羽竜忠男，西川貢，管公男：ディジタルスタッキング方式による弾性波探査，応用地質，第18巻，第1・2号，pp. 38-51，1977.
- 9) T. Shiotani and D. G. Aggelis: Evaluation of Repair Effect for Deteriorated Concrete Piers of Intake Dam Using AE Activity, Journal of Acoustic Emission, Vol. 25, pp. 69-79, 2007.

- 10) Shiotani, T., S. Momoki, H. K. Chai and D. G. Aggelis: Elastic wave validation of large concrete structures repaired by means of cement grouting, Elsevier Science, Construction & Building Materials, Vol. 23, No. 7, pp. 2647-2652, 2009.
- 11) J. F. Chaix, V. Garnier and G. Corneloup: Ultrasonic wave propagation in heterogeneous solid media: Theoretical analysis and experimental validation, Ultrasonics, Vol. 44, pp. 200-210, 2006.
- 12) Wonsiri, P., Jacek, J., Jianmin, Q., Kimberly, E. K. and Laurence J. J.: Characterization of entrained air voids in cement paste with scattered ultrasound, NDT&E International, Vol. 39, pp. 514-524, 2006.
- 13) Ying, C. F. and Truell, R.: Scattering of a plane longitudinal wave by a spherical obstacle in an isotropically elastic solid, J Appl Phys 27, pp. 1086-1097, 1956.
- 14) D. G. Aggelis, S. V. Tsinopoulos and D. Polyzos: An iterative effective medium approximation (IEMA) for wave dispersion and attenuation predictions in particulate composites, suspensions and emulsions, J Acoust Soc Am, Vol. 116, pp. 3443-3452, 2004.
- 15) Waterman, P. C. and Truell, R.: Multiple scattering of waves, J Math phys, Vol. 2, pp. 512-537, 1961.

第4章 弾性波の周波数減衰特性を用いた減衰トモグラフィ手法に関する研究

4.1 はじめに

弾性波は弾性体を伝わる波動であり、波動とは媒質中の1点の粒子の振動が順次隣の粒子に移り、その振動が遠くまで伝わっていく現象のことを指す。波動は、粒子の振動方向や波の進行方向によって、縦波（P波、Primary wave）、横波（S波、Secondary wave）、レイリー波（R波、Rayleigh wave）など、いくつかの種類に分けられる。弾性波を用いたコンクリートの非破壊評価¹⁾は、これら弾性波動の伝播挙動が、欠陥部あるいはコンクリートの力学的特性など、評価したい対象の物理的性質に依存して変化することを利用して実施される。評価に用いられる弾性波パラメータとしては、伝播速度（走時）、振幅・エネルギー、周波数などがある。表4.1-1に各弾性波パラメータとコンクリートの評価対象との対応関係を示す。

表 4.1-1 弾性波パラメータと評価対象との対応関係¹⁾

弾性波パラメータ	原理	評価対象（代表例）
伝播速度	伝播経路の変化	ひび割れの有無
振幅・エネルギー	欠陥部での減衰	ひび割れの有無
周波数	共振周波数	剥離・空隙
位相	位相の変化	ひび割れ深さ

図4.1-1～図4.1-3に伝播速度、振幅・エネルギー、周波数、ならびに位相による評価の概念を示す。図4.1-1に示すように、伝播速度に関しては、コンクリート構造物内部に欠陥が存在する場合、弾性波は欠陥部を避けて伝わる。そのため、波線経路が長くなり、見かけの伝播速度が遅くなる。ただし、微細な欠陥の場合は、波線経路がほぼ直線となり、影響がほとんどなくなる。一方、振幅・エネルギーに関しては、欠陥部を透過する際に、振幅・エネルギーが減衰する。微細な欠陥に対しても影響は大きい。図4.1-2に示すように、周波数に関しては、コンクリート構造物の部材厚と縦弾性波速度から算出される共振周波数に対し、内部に欠陥がある場合、同様にして算出される共振周波数が低くなる。図4.1-3に示すように、位相に関しては、弾性波がひび割れ先端を回折して受信点に到達する際に、ひび割れ深さとの幾何関係により受信波形の位相が変わる。これは、縦波の超音波はポアソン効果によって進行方向に直角な方向にも二次的な超音波（圧縮波）を生じており、臨海入射角（コンクリートのポアソン比を0.25とすると約45度）を超えると上向き位相の反転した圧縮波の受信波形が得られる。この幾何関係に基づき、ひび割れの深さを推定する。

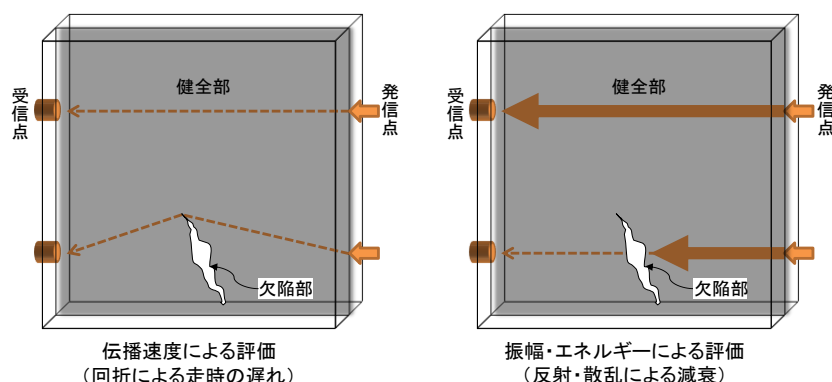


図 4.1-1 弾性波法による評価概念（伝播速度と振幅・エネルギーによる評価）¹⁾

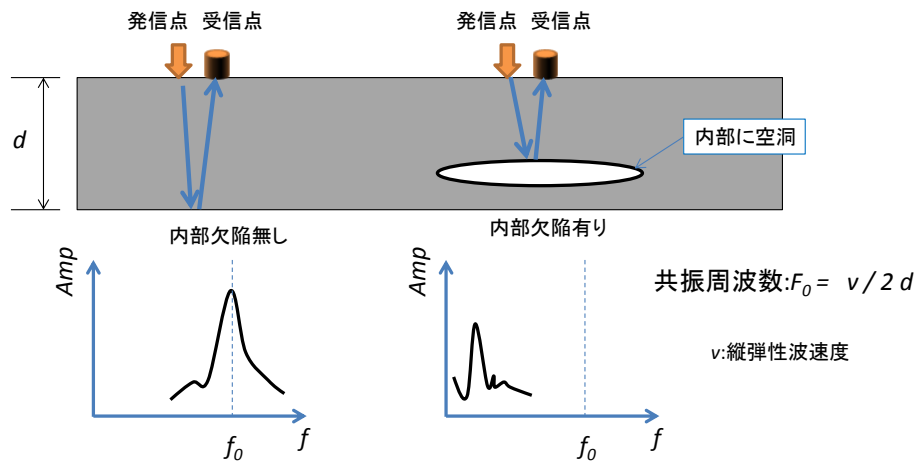


図 4.1-2 弾性波法による評価概念（周波数による評価）¹⁾

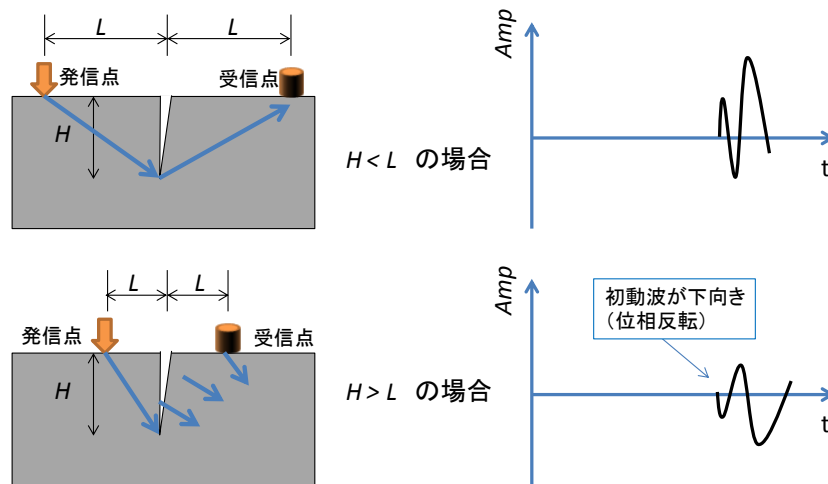


図 4.1-3 弾性波法による評価概念（位相による評価）¹⁾

ここで、弾性波トモグラフィ手法により欠陥（ひび割れや空洞など）の有無を評価する場合に直接的に関係のある弾性波パラメータは伝播速度、および振幅・エネルギーである。前述のように、両者とも欠陥に影響を受けるものの、欠陥に対する影響度合いは異なる。伝播速度は、伝播経路や弾性係数の変化にともなって変動するが、振幅・エネルギーは、距離減衰や粘性減衰、ひび割れや空隙による反射・散乱によって、大きく減衰することが知られている²⁾。例えば、中心部に欠陥を有する $1.0 \times 1.0 \text{ m}$ の対象領域を考える（図 4.1-4）。領域内における弾性波の伝播速度（ V ）は $4,000 \text{ m/s}$ とする。また、欠陥は空洞であり、領域面積に対する割合を空隙率として、空隙率 0（空洞無し）、1, 5, 10%の空洞を想定し、パラメータの感度分析を行った。弾性波計測における弾性波の励起周波数（ f ）は 100 kHz 、センサ間距離（ L ）は 1.0 m で欠陥の中心を横断するセンサ配置とする。

図 4.1-4 に示すように、弾性波は空洞を回折して伝播する。その結果、走時が遅れ、センサ間距離における見かけの伝播速度は遅くなる。一方、受信点における振幅（ A_r ）は、式 4.1-1 にしたがって、伝播距離とともに減衰する³⁾。ただし、この式は球面波を仮定したのものである。

$$A_L = B_0 \frac{1}{L} \exp\left(-\frac{\pi f}{Q} t\right) \quad (4.1-1)$$

ここで、 B_0 は波源強度（発信点における振幅に相当）、 t は弾性波の走時、 f は周波数、 Q は減衰の強さを表す定数であり、コンクリートの値として既往研究より $Q=12$ とした。空隙率に対する、センサ間距離における見かけの伝播速度、および式 4.2-1 より求めた回折経路における減衰比 (A_L/B_0) の比率を図 4.1-5 に示す。空隙率の増加にともなう減衰比の低下が、伝播速度よりも大きく、伝播速度よりも感度が高いことがわかる。このことから、伝播速度では検出できない微細なクラックについても、振幅・エネルギーを用いることで、検出できる可能性があることを示している。

なお、式 4.1-1 によれば、周波数が大きくなるほど減衰が大きくなることがわかる。これは、波動を伝える媒体の粘性減衰を示している。粘性減衰は、波動のエネルギーが摩擦などによって熱エネルギーに転化する現象であり、1 回の振動にともなうエネルギーの損失に基づく減衰であるため、高い周波数ほど大きく減衰する。周波数応答スペクトルにおいて、欠陥の規模が大きくなるほど卓越周波数や重心周波数が低い周波数へと遷移する傾向は、この粘性減衰の影響によるものである。

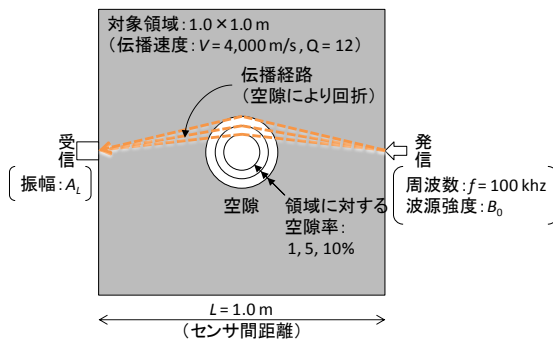


図 4.1-4 感度分析モデル

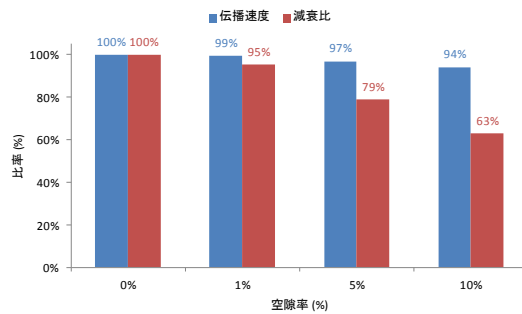


図 4.1-5 空隙率に対する比率

本章では、第 2 章で述べた弾性波トモグラフィ手法における「②健全性の評価精度の向上」の課題を解決するため、コンクリート構造物内部の欠陥を、より高感度に検出するために、弾性波パラメータの振幅に着目し、欠陥に対する影響度合いを実験的に検証する。さらに、弾性波の振幅の減衰特性に周波数依存性があること³⁾を考慮したスペクトル減衰率を用いることで、内部の損傷をより高感度に評価可能な減衰トモグラフィ手法^{5),6)}を提案する。さらに、高い感度を有する評価方法が必要と考えられる PC 構造物の健全性評価への本手法の適用性を、数値解析によるシミュレーション⁶⁾により検証する。

4.2 損傷程度と弾性波の振幅の減衰に関する基礎試験

4.2.1 試験概要

図 4.2-1 に健全試験体と模擬損傷を有するモルタル試験体の概要図を、写真 4.2-1 に模擬損傷を有するモルタル試験体の一例とその作成状況を示す。モルタル試験体の寸法は 150×150×150 mm であり、模擬損傷を混入しない健全試験体と、打設時にビニル片 (15×15×0.5 mm/枚) を混入させた模擬損傷試験体を作成

した。なお、ビニル片はコンクリートに比べ音響インピーダンスが極端に小さく、ひび割れや空隙と同様に不連続面となり、ひび割れや空隙を実験的に再現する手法として一般的に用いられている。木村らは、模擬損傷試験体を用いた欠陥検出実験において、音響インピーダンスの異なる塩化ビニル板（厚さ 1mm）が欠陥として使用可能な材料である⁷⁾ということを示している。かつ、供用中の実構造物のように拘束圧や荷重などが作用する場合、微細なひび割れが閉口または接触している状態を考える必要がある⁸⁾。したがって、ビニル片を模擬損傷として混入させ、一体的に打設することで、より実際の微細なひび割れに近い状態を模擬できると考えた。模擬損傷試験体については、軽微な損傷から重度の損傷まで模擬した（体積比 1, 5, 10% の模擬損傷）3 つの試験体を作成した。弾性波の測定は超音波パルス発生器（PUNDIT, C. N. S. Instruments Ltd. 社製、周波数範囲 30-100 kHz）を用いて透過法で行った。波動を受信するセンサは共振型 AE センサ（R6, 日本フィジカルアコースティクス社製、共振周波数 60 kHz）を用いた。測定の概要を図 4. 2-2 に示す。超音波パルス発生器から発信される波動と試験体を透過する波動をセンサにより受信し、発信点波形と受信点波形との初動走時より伝播速度を、発信点波形の最大振幅に対する受信点波形の最大振幅の比より減衰比を求めた⁸⁾。

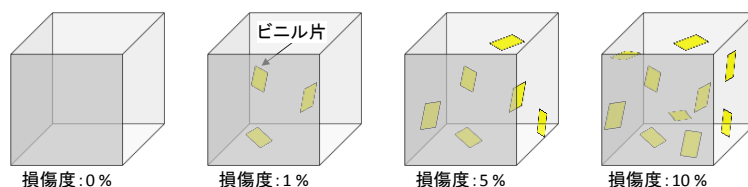


図 4. 2-1 模擬損傷を有するモルタル試験体

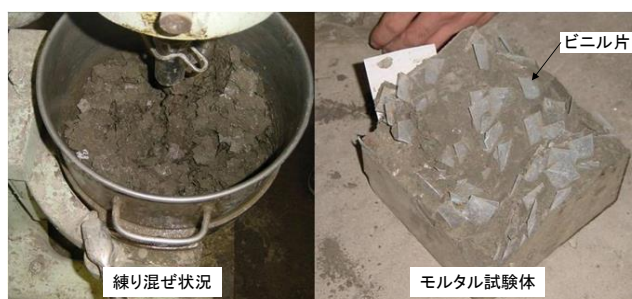


写真 4. 2-1 模擬損傷を有するモルタル試験体

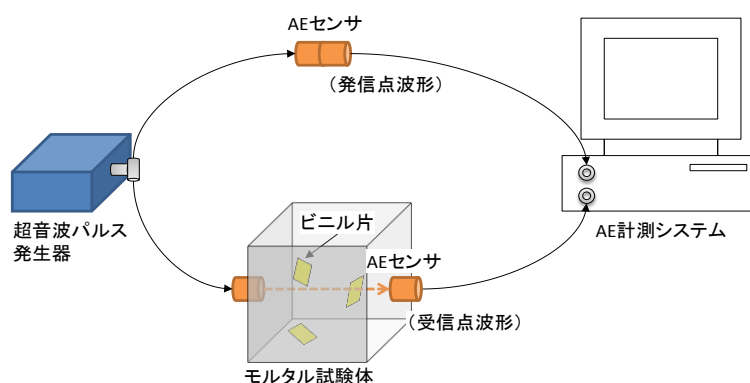


図 4. 2-2 モルタル試験体の弾性波測定の概要

4.2.2 試験結果と考察

図 4.2-3 に、測定された各モルタル試験体における受信波形を示す。損傷度に対する初動の立ち上がり時刻（図中△印）の変化に比べ、損傷度に対する最大振幅（図中○印）の変化は顕著に表れており、損傷度の高い試験体ほど、受信波形の振幅が小さくなることからわかる。

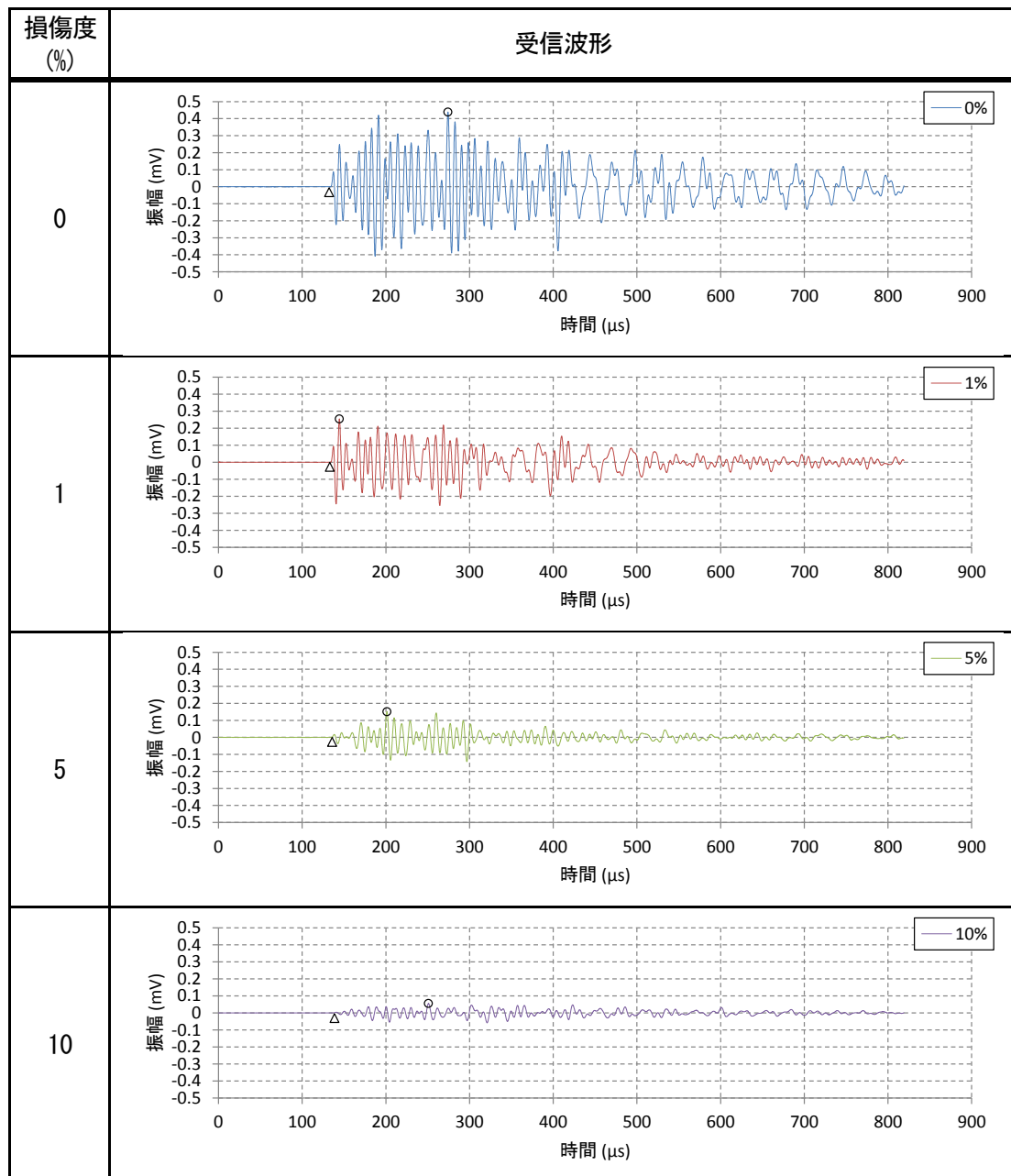


図 4.2-3 各モルタル試験体における受信波形

図 4.2-4 に、試験で測定された各試験体の損傷度に対する弾性波の伝播速度、および減衰比の比率を示す。ここで、それぞれの比率は損傷度 0% の健全な試験体で測定された値により正規化している。図 4.2-4 から、両パラメータともに損傷度が大きくなるにしたがって比率が低下することがわかる。また、伝播速度に比べ、減衰比は極めて顕著に低下しており、減衰特性は損傷度を高感度に評価できる可能性があると考えられる。

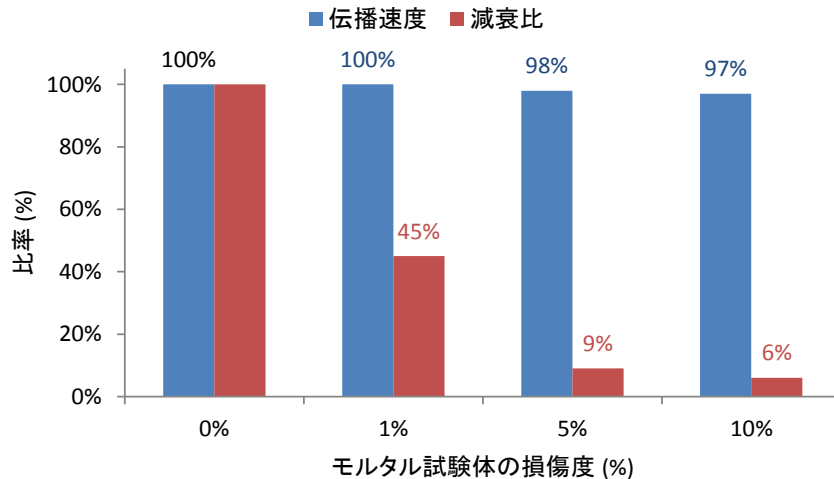


図 4.2-4 損傷度に対する弾性波パラメータの比率

4.3 スペクトル減衰率による弾性波トモグラフィ手法の提案

伝播速度に比べ損傷に対して感度の高いパラメータである振幅の減衰特性に着目し、トモグラフィ手法に適用する。振幅の減衰特性に着目しトモグラフィ手法に適用した研究は、過去に地盤工学分野（ジオトモグラフィ）において行われている¹⁰⁾⁻¹⁵⁾。また、土木工学分野においても部材の健全性評価に対し振幅の減衰特性を適用した研究事例¹⁶⁾⁻¹⁹⁾もあり、振幅の減衰特性の有効性が示されている。本研究では、弾性波の減衰率を算出し、トモグラフィ解析に用いた減衰トモグラフィ手法を提案する。

ただし、弾性波はその周波数により伝播挙動（伝播速度や振幅の減衰特性）が異なる周波数依存性がある³⁾。この周波数依存性の影響を除去するため、振幅最大値の比率ではなく、図 4.3-1 に示すように、発信点の卓越周波数における受信点と発信点のパワースペクトルの比率を減衰率（以下、スペクトル減衰率）として用いる。

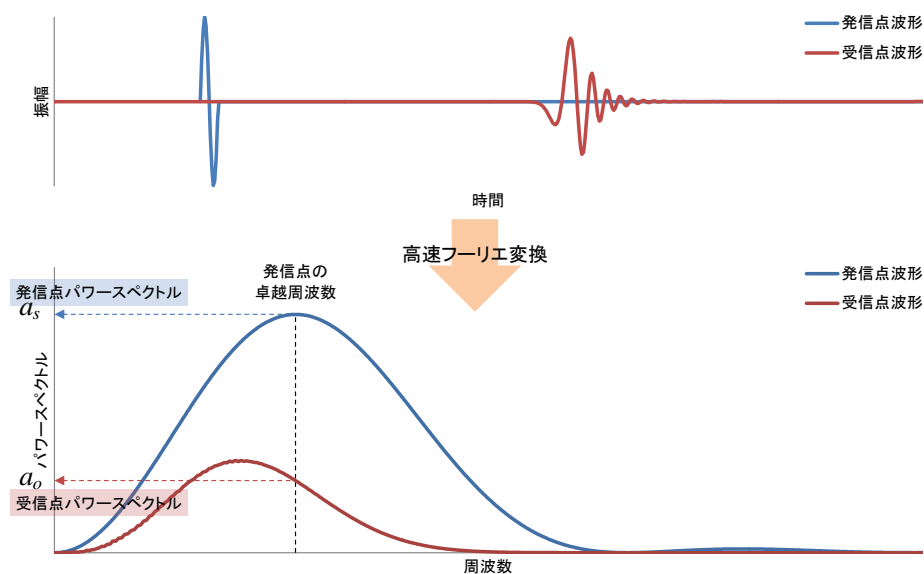


図 4.3-1 スペクトル減衰率の算出方法

以下に、スペクトル減衰率をトモグラフィ解析に実装するためのアルゴリズムを示す。弾性波測定において得られる減衰率 A_{OBS} （以下、観測減衰率）は式(4.3-1)で求められる。

$$A_{OBS} = a_o/a_s \quad (4.3-1)$$

ここで、 a_o は発信点波形の卓越周波数における受信点波形のパワースペクトル、 a_s は発信点波形の卓越周波数における発信点波形のパワースペクトルである。

次に、要素分割モデルで得られる理論上のスペクトル減衰率（以下、理論減衰率）を求める。理論減衰率は、弾性波がある媒質に入力されたとき、その媒質が波動を減衰させる現象として、光の媒質による吸収と類似の現象と見なし、ランベルト・ベールの法則²⁰⁾により定式化した。 a_o および a_s の関係は、係数 α を用いて式(4.3-2)により示される。

$$a_o = a_s e^{-\alpha l} \quad (4.3-2)$$

これは、距離 l 進むにつれ $e^{-\alpha l}$ 倍減衰する（吸収される）ことを意味する。式(4.3-2)は係数 β を用いて書き換えられ（式(4.3-3)）、理論減衰率 A_{CAL} は式(4.3-4)で求められる。

$$a_o = a_s 10^{-\beta l} \quad (4.3-3)$$

$$A_{CAL} = a_o/a_s = 10^{-\beta l} \quad (4.3-4)$$

ここで、観測減衰率（式(4.3-1)）および理論減衰率（式(4.3-4)）の表現をデシベル（dB）によって改める。

$$A_{OBS} = 10 \log(a_s/a_o) \quad (4.3-5)$$

$$A_{CAL} = \beta l \quad (4.3-6)$$

以上の手順により、理論減衰率が単位長さ当たりの減衰率（以下、単位減衰率） β dB/m を用いて求められる。その後は、伝播速度を用いるトモグラフィ法のアルゴリズム²¹⁾と異なり、各要素に単位減衰率 β を与え、各要素を横切る波線長を用いて理論減衰率 A_{CAL} （式(4.3-6)）と、観測減衰率 A_{OBS} （式(4.3-5)）に対する残差を求め、逆解析において SIRT 法²²⁾により各要素の単位減衰率 β を補正する。

本アルゴリズムの実装により、スペクトル減衰率に基づく弾性波トモグラフィ（以下、減衰トモグラフィ）が可能となる。

4.4 減衰トモグラフィ手法の現場検証

4.4.1 現場検証の概要

トンネル建設工事の明かり巻き覆工コンクリートにおいて発生したひび割れ部を対象として、提案した減衰トモグラフィ手法の検証を行った。本検証では減衰トモグラフィ手法による評価を行うとともに、比較のために伝播速度を用いた弾性波トモグラフィ（以下、速度トモグラフィ）手法による評価も合わせて行った。検証を行ったトンネルの明かり巻き覆工コンクリートの外観を写真 4.4-1 に示す。



写真 4. 4-1 現場検証したトンネルの明かり巻き覆工コンクリート

4. 4. 2 計測内容

図 4. 4-1 に検証断面におけるセンサ配置および弾性波の伝播経路イメージを示す。また、同図に外観で確認されたひび割れ位置も併せて示す。写真 4. 4-2 には覆工内側のセンサ配置状況を示す。センサは共振型 AE センサ (AE603SWA40, 富士セラミックス社製, 共振周波数 60 kHz, 40 dB プリアンプ内蔵) を用いた。各センサ近傍において超音波パルス発生器 (PUNDIT, C. N. S. Instruments Ltd. 社製, 周波数範囲 30-100 kHz) により発信センサを介して弾性波を入力する。なお、発信センサは共振型 AE センサ (R6, 日本フィジカルアコースティクス社製, 共振周波数 60 kHz) を用いた。厚さ 650 mm の断面の両側に 130 mm 間隔で 6 個のセンサを 1 列に, 計 12 個設置した。したがって波線は, $6 \times 6 = 36$ 本である。算出したパラメータを基に, 第 3 章で述べた速度トモグラフィ手法および 4. 3 で示した減衰トモグラフィ手法を適用する。解析モデルを図 4. 4-2 に示す。節点数は 121 点, 要素の分割は 65 mm 間隔とし, 計 100 個の要素それぞれの弾性波速度とスペクトル減衰率を解析により求めた。

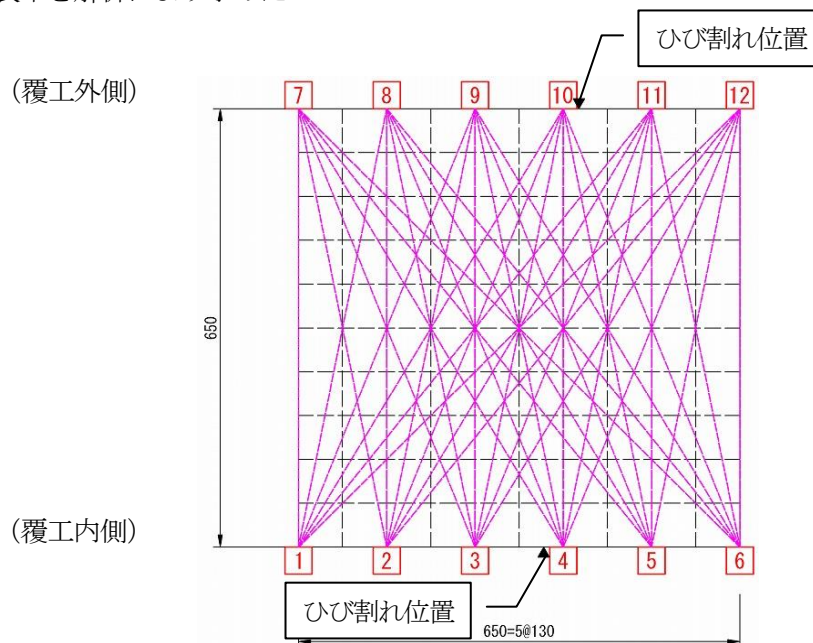
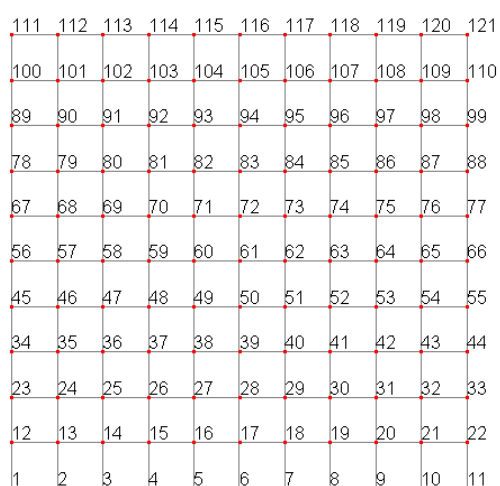


図 4. 4-1 センサ配置および伝播経路イメージ (平面図)



写真 4. 4-2 センサ配置状況（覆工内側）



(a) 節点 (121 個)

91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

(b) 要素分割 (100 個)

図 4. 4-2 トモグラフィ解析モデル

4. 4. 3 計測結果と考察

収録した波形の一例（発信点：Ch_01，受信点：Ch_07～12：図 4. 4-3）を図 4. 4-4 に示す。図 4. 4-3 中に示すように目視で確認されたひび割れ位置から，発信点 Ch_01 から伝播する弾性波動は，受信点 Ch_07, 08, 09, 10 までは最短距離を伝播するが，ひび割れ位置より先に位置する受信点 Ch_11, 12 については，伝播経路にひび割れが存在する可能性が考えられ，波動の伝播に影響があると想定される。実際に計測で収録された波形（図 4. 4-4）からも，受信点 Ch_11, 12 の波形は初動の立ち上がりが不明瞭で，かつ振幅も非常に小さい。

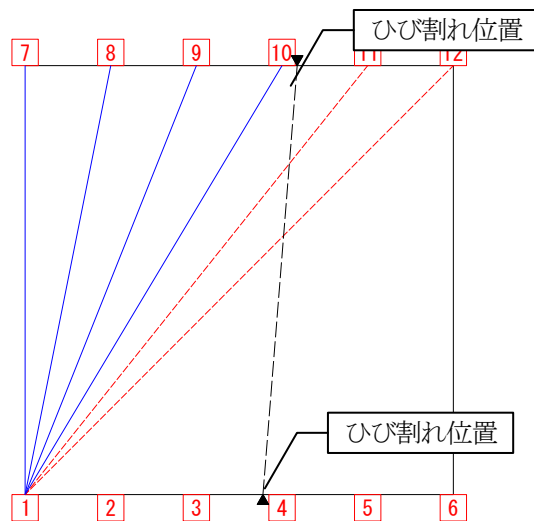
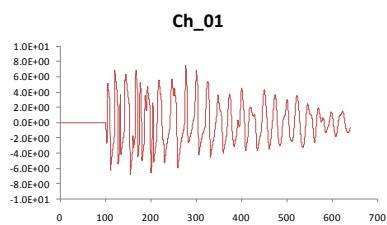
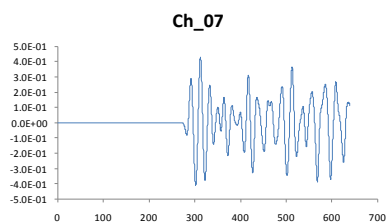


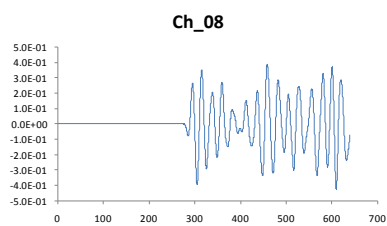
図 4. 4-3 伝播経路イメージ (発信点 : Ch_01)



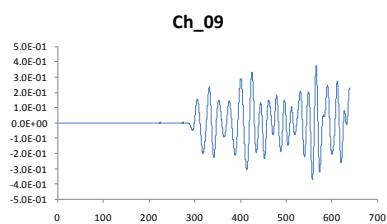
発信波形(Ch_01)



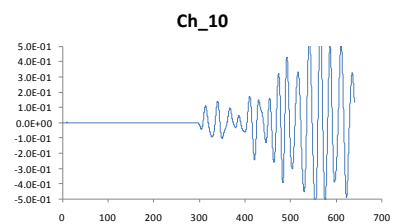
受信波形(Ch_07)



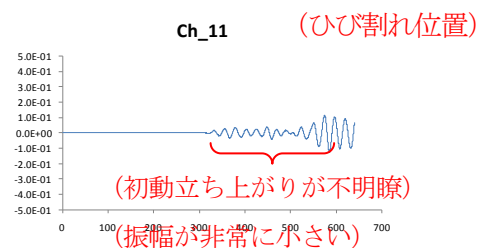
受信波形(Ch_08)



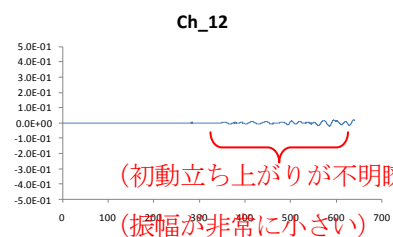
受信波形(Ch_09)



受信波形(Ch_10)



受信波形(Ch_11)



受信波形(Ch_12)

図 4. 4-4 発信点センサ Ch_01, 受信点センサ Ch_07~12 における波形

図 4. 4-5 に、スペクトル減衰率を求めるために高速フーリエ変換を行った波形の一例（発信点：Ch_01，受信点：Ch_07～12：図 4. 4-3）を示す。反射や散乱による波の影響を極力低減するために、図 4. 4-4 に示したような全波形を対象とするのではなく、初動からごく限定した区間の波形を用いる。本研究では、初動立ち上がり部から 1.5 波長分の波形を対象とした。図 4. 4-6 に、これらより求めたパワースペクトルを示す。ひび割れ位置より先に位置する受信点 Ch_11, 12 については、パワースペクトル（図 4. 4-6）からも、受信点 Ch_11, 12 のパワースペクトルは非常に小さく、大きく減衰していることがわかる。

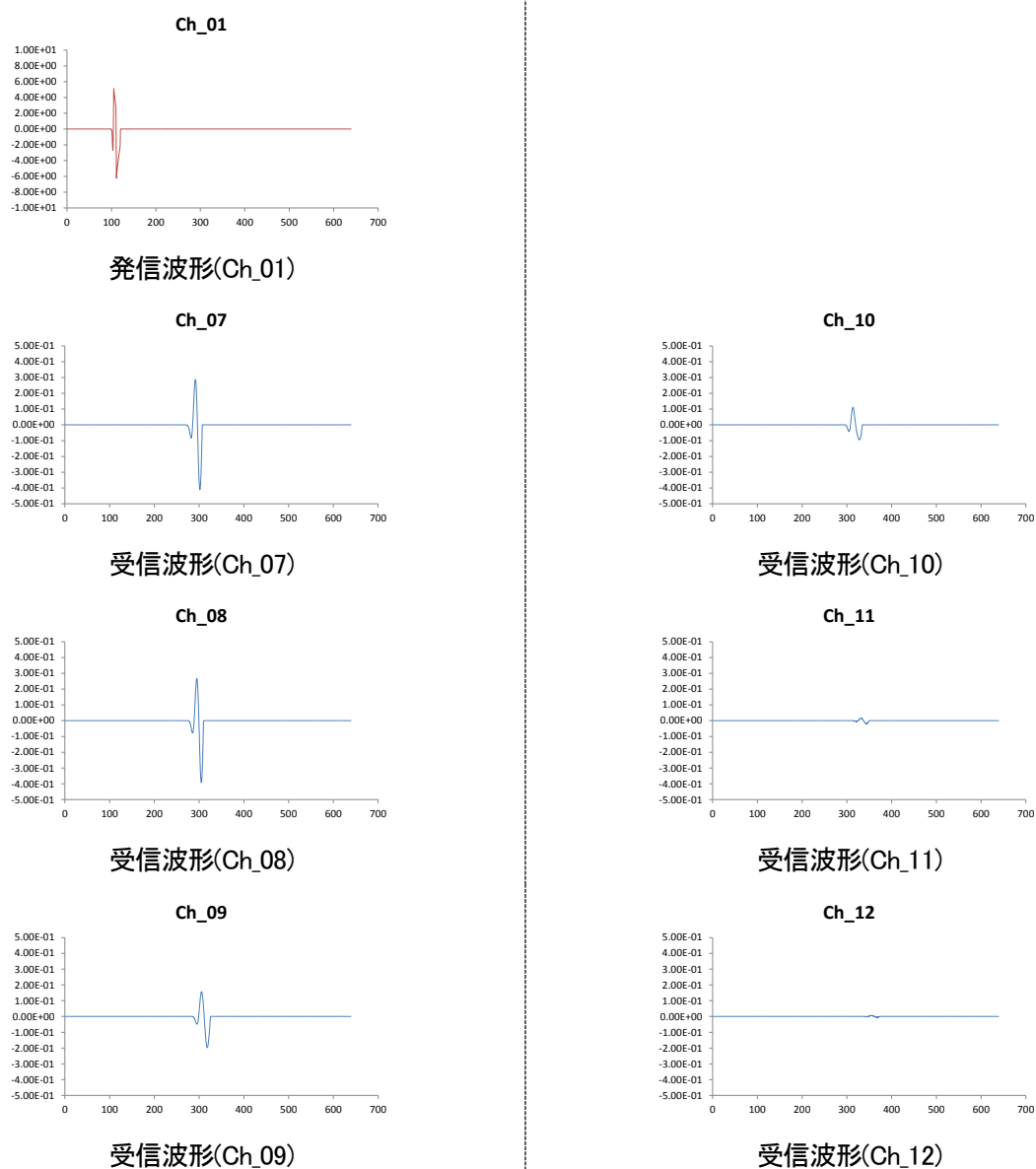
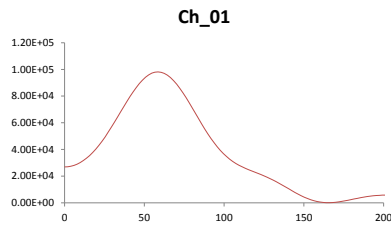
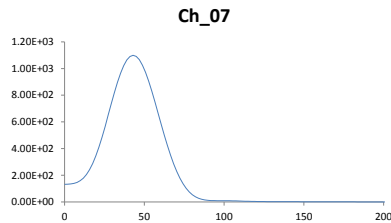


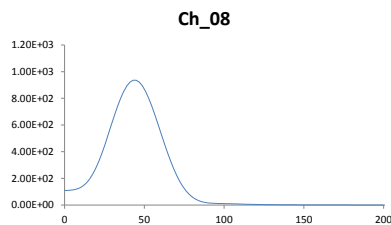
図 4. 4-5 発信点センサ Ch_01，受信点センサ Ch_07～12 における波形（初動波形抽出）



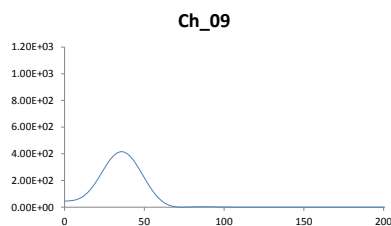
発信パワースペクトル(Ch_01)



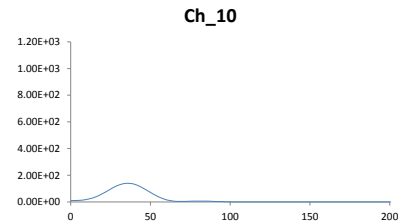
受信パワースペクトル(Ch_07)



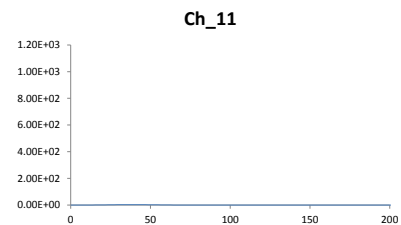
受信パワースペクトル(Ch_08)



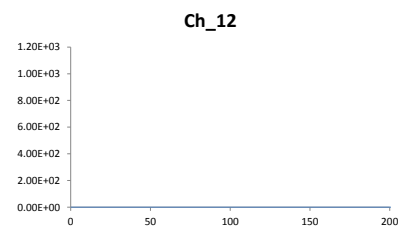
受信パワースペクトル(Ch_09)



受信パワースペクトル(Ch_10)



受信パワースペクトル(Ch_11)



受信パワースペクトル(Ch_12)

図 4. 4-6 発信点センサ Ch_01, 受信点センサ Ch_07~12 におけるパワースペクトル

計測した波形を基に速度トモグラフィ手法により解析を行った結果を、図 4. 4-7 に示す。図中のコンターレベルは 3,500~4,000 m/s とし、3,500 m/s 以下を赤色、4,000 m/s 以上を濃青色としている。第 3 章で示した弾性波速度コンター画像（図 3. 3-11~図 3. 3-15、コンターレベルは 2,000~4,000 m/s とし、2,000 m/s 以下を赤色、4,000 m/s 以上を濃青色としている）よりも狭いコンターレベルであり、速度による色の変化は強調されることになる。しかしながら、速度トモグラフィ手法による解析結果では、外観で確認されたひび割れ位置を先端として、内部に周囲よりも弾性波の伝播速度がわずかに低下している領域が見られるものの、画像内の速度差だけで、ひび割れの分布を推定することは難しい。

次に、同じ計測結果に基づく減衰トモグラフィ手法の解析結果を図 4. 4-8 に示す。減衰トモグラフィ手法では、速度の画像ではなく、単位減衰率の画像となる。図中のコンターレベルは、算出された値の最大値、最小値を基準としている。

減衰トモグラフィ手法による解析結果では、外観で確認されるひび割れ位置からは多少ずれがあるものの、それらを端部とした高値の減衰率が内部で繋がるように分布している。

以上のように、減衰トモグラフィ手法を用いることで、速度トモグラフィ手法と同じ計測結果を活用しながら、さらに高感度に内部欠陥を推定できると考えられる。

この結果については、以下に示すように推察できる。通常、弾性波は欠陥部を避けて伝わるため、波線経路が長くなり、見かけの伝播速度が遅くなる。ただし、微細な欠陥の場合は、波線経路がほぼ直線となり、影響がほとんどなくなる。一方、振幅・エネルギーに関しては、欠陥部を透過する際に、振幅・エネルギーが減衰し、微細な欠陥に対しても減衰の影響は大きいと考えられる。榊原ら²⁾は、小さな欠陥の場合は、波が減衰しながらも欠陥を透過したためであるとしている。

今回の計測は、損傷規模の小さいひび割れ幅を対象としており、トンネル覆工コンクリートという全面が拘束された条件での計測結果である。さらに適用範囲を拡大するためには、ひび割れ幅と両手法との定量的な関係について、今後も検討していく必要がある。

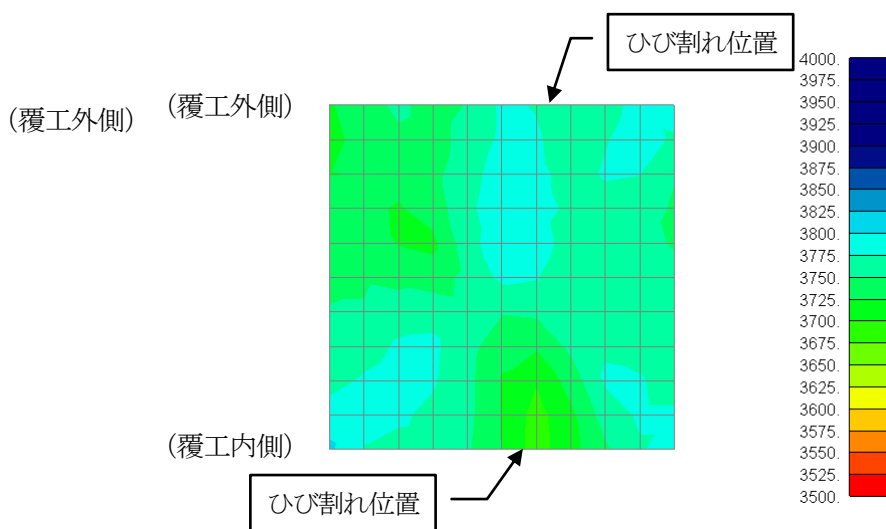


図 4.4-7 速度トモグラフィ結果（弾性波速度コンター画像：m/sec）

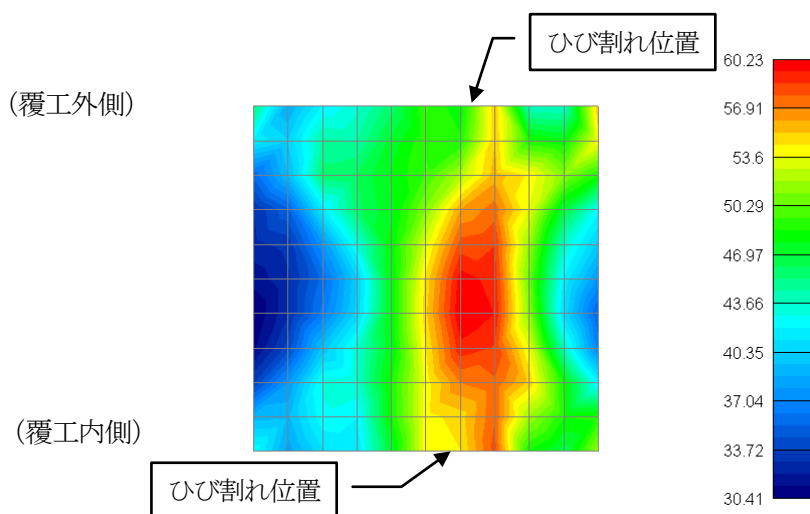


図 4.4-8 減衰トモグラフィ結果（単位減衰率コンター画像：dB/m）

4.5 減衰トモグラフィ手法による PC 構造物の健全性評価への適用性検証

4.5.1 概要

ポストテンション方式のプレストレストコンクリート構造物（以下、PC 構造物）は、コンクリート部材と PC 鋼材の一体化を確保し、かつ PC 鋼材を腐食から保護するために、PC 鋼材を通すシース内にグラウトを密実に充填する必要がある。しかしながら、近年、既設の PC 構造物においてグラウトの充填不良が確認されており、これが問題視されている^{23),24)}。この充填不良によるシース内の空隙が放置され、コンクリート部材の経年劣化などにより外部から雨水が侵入する事態を招くと、PC 鋼材が腐食し、破断や突出による耐荷性能の低下や第三者被害を起こす可能性がある。

コンクリート部材面からのシース内の充填不良の検出方法として、X 線透過法²⁵⁾や弾性波法²⁶⁾の研究が行われている。X 線透過法は適用可能な部材厚さが限られ、さらには周辺環境への配慮が必須となるが、適用可能な部位においてはグラウトの充填部と未充填部を視覚的かつ正確に把握できる²⁵⁾。また、弾性波法の適用は、主にシースからの反射現象を分析することでシース内の充填状態を推定することを目的としている²⁶⁾。両手法は、原理としては確立されつつあるものの、これらの手法の検査領域が局所的であることは否めず、国内の橋梁約 16 万橋の半数近く（42.6%）、総延長 3,500 km にもおよぶ PC 橋²⁷⁾をはじめ、多数の PC 構造物への適用にはなお課題が山積している。

このように、PC 構造物の健全性を評価するためには、躯体の健全性の他に、PC グラウトの充填性を評価する必要がある。ただし、PC グラウト充填性に関しては、躯体に比べ微小な部位であり、速度トモグラフィ手法では、PC グラウト充填性に関する評価は困難であることが想定される。

一方、減衰トモグラフィ手法を用いることで、同じ計測結果から速度トモグラフィ手法によるコンクリート構造物の比較的大きな欠陥位置の把握とともに、微細な欠陥の検出が同時に可能となることが前節までに示された。

以上のことから、速度トモグラフィ手法と減衰トモグラフィ手法を同時に用いることで PC 構造物の躯体であるコンクリート構造体の異常の検出と、シース内の充填率の同時評価を行う弾性波トモグラフィ手法⁴⁾を提案し、数値シミュレーションにより本手法の有効性を検証する。

4.5.2 数値解析によるシミュレーション

速度トモグラフィおよび減衰トモグラフィによる鋼製シース内のグラウト充填率の評価への適用に関する基礎的な検証として、数値解析によるシミュレーションを行った。シミュレーション検証に用いた数値解析ソフトウェア Wave2000 (Cyberlogic 社製) は、二次元の弾性波波動方程式について近似解を計算するもので、有限差分法を基本とし、式(4.5-1)で示す弾性波波動方程式を用いている。

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \left[\mu + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right] \nabla^2 w + \left[\lambda + \mu + \phi \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\eta}{3} \frac{\partial}{\partial t} \right] \nabla(\nabla \cdot w) \quad (4.5-1)$$

ここで、 ρ は密度、 λ および μ はラメ定数、 η はせん断粘性係数、 ϕ は体積粘性係数、 t は時間である。また、 w は二次元の列ベクトルで、その構成要素は位置座標 (x,y) における変位の x 成分と y 成分であり、式(4.5-2)で表される。

$$w = [w_x(x, y, t) \quad w_y(x, y, t)]' \quad (4.5-2)$$

本研究では、図 4.5-1 に示すような鋼製シース内の PC 鋼材を保護するグラウトの充填率 (0, 50, 100%) について、シミュレーションを行った。

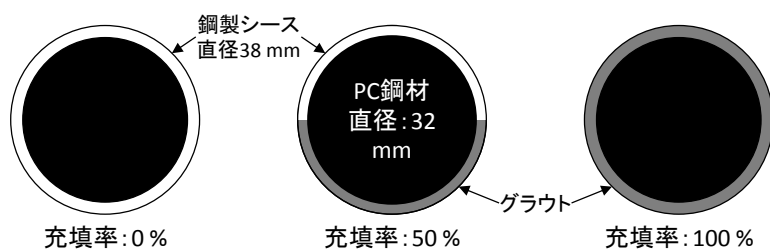


図 4.5-1 グラウト充填率

図 4.5-2 にモデル・センサ配置図を示す。中央付近の円形的位置に鋼管シースをモデル化している。センサはモデル左右に 7 個ずつ、計 14 個を配置した。図 4.5-3 に示す 49 本全ての走査線において観測走時および観測減衰率を測定し、図 4.5-4 に示す要素分割モデルにおいて弾性波トモグラフィを行った。当シミュレーションでは、上下端に境界条件を設けず無限延長とし、反射波による影響を考慮しないこととした。各部材は密度 ρ 、ラメ定数 λ および μ により設定した。ラメ定数は弾性係数とポアソン比から算出した。各部材の設定値を表 4.5-1 に示す。また、減衰率に関わるパラメータである各種粘性係数は、既往の弾性波測定データをもとに逆解析により同定した。入力する弾性波はガウスモノパルス (重心周波数 1 MHz) を設定した。波形およびパワースペクトルの一例を図 4.5-5 および図 4.5-6 に示す。

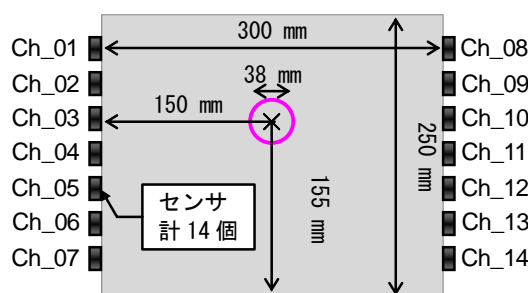


図 4.5-2 モデル・センサ配置図

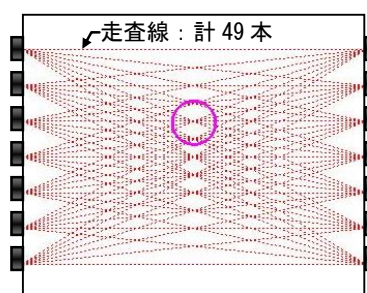


図 4.5-3 モデル上の走査線図

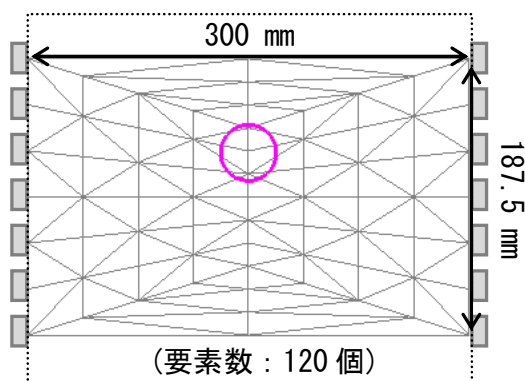
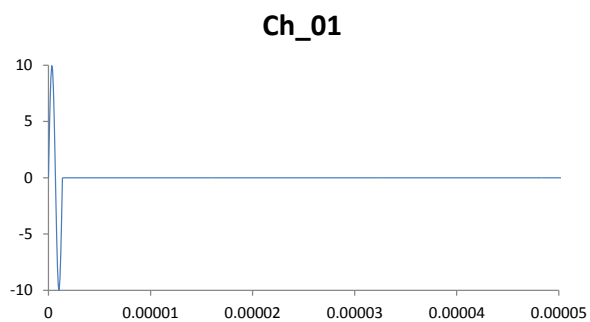


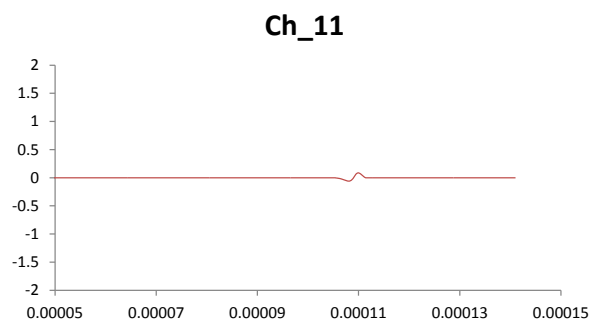
図 4.5-4 要素分割モデル

表 4.5-1 シミュレーションに用いた各部材の設定値

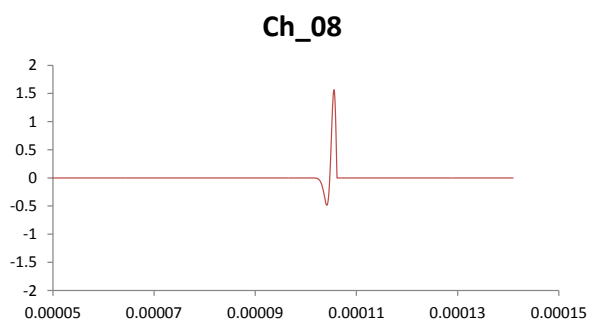
	コンクリート	グラウト	鋼製シース PC 鋼材
ρ [kg/m ³]	2,380	2,236	8,030
λ [MPa]	9,875	7,500	100,910
μ [MPa]	13,636	11,250	78,170
η [Pa·s]		50,000	—
ϕ [Pa·s]		0.001	—



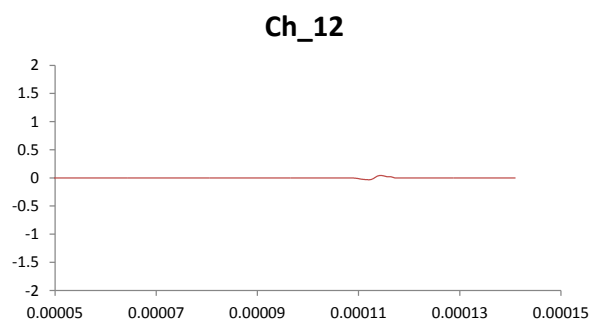
発信波形(Ch_01)



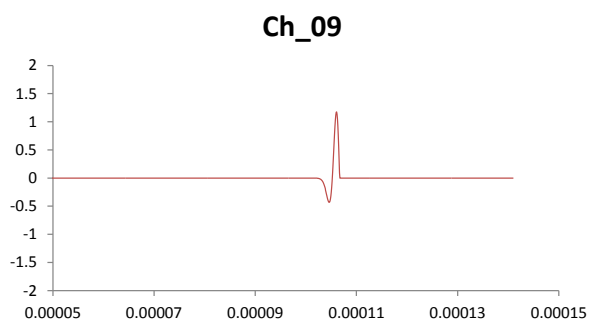
受信波形(Ch_11)



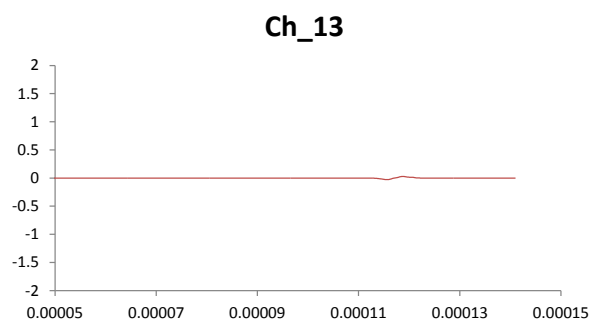
受信波形(Ch_08)



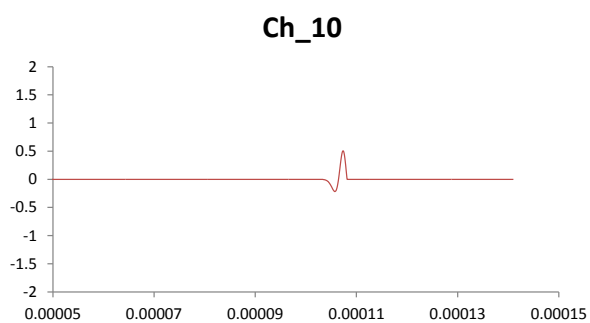
受信波形(Ch_12)



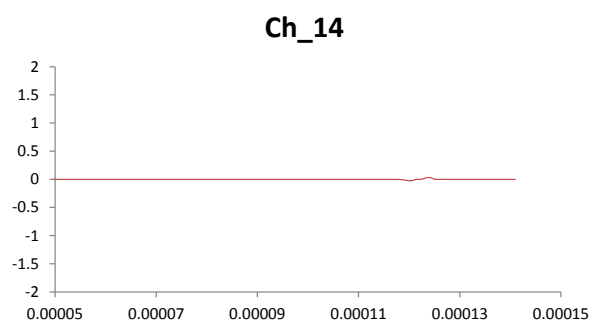
受信波形(Ch_09)



受信波形(Ch_13)



受信波形(Ch_10)



受信波形(Ch_14)

図 4.5-5 発信点センサ Ch_01, 受信点センサ Ch_08~14 における波形 (初動波形抽出)

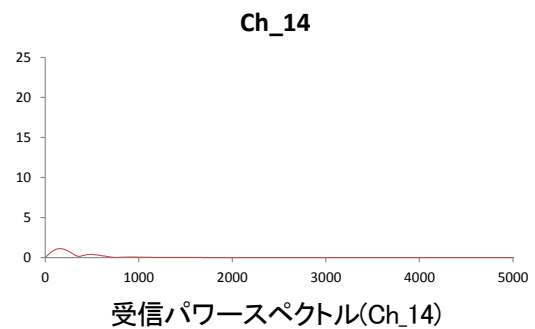
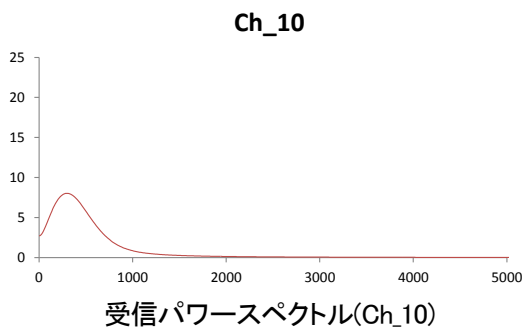
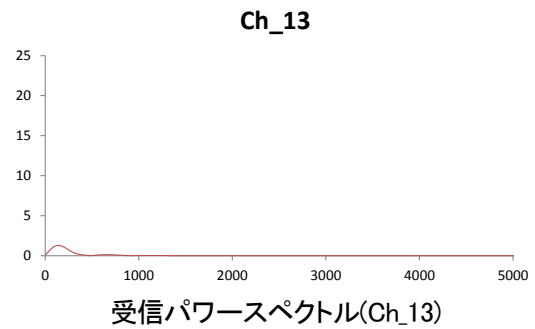
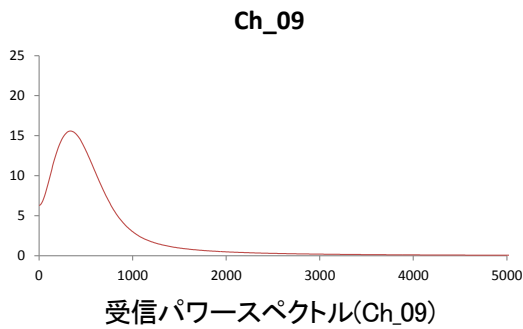
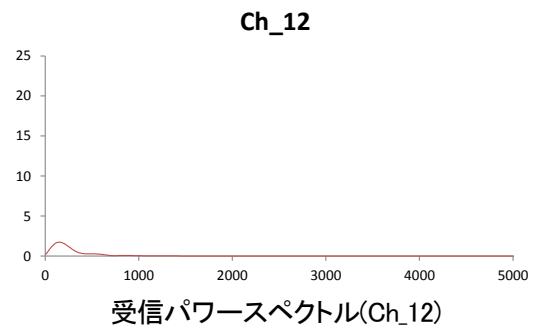
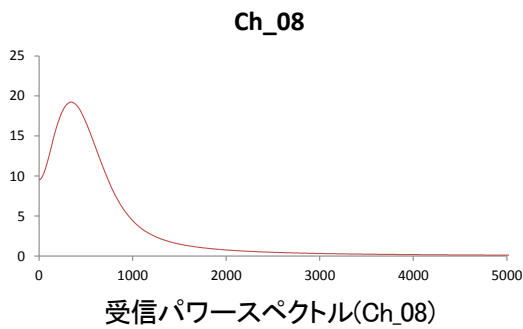
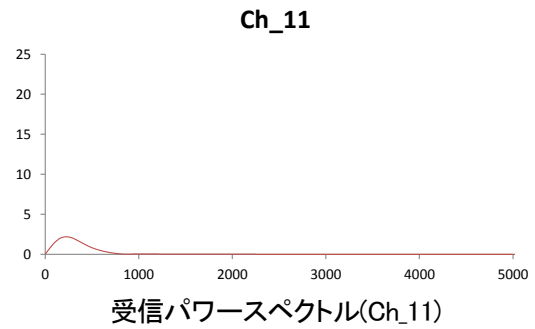
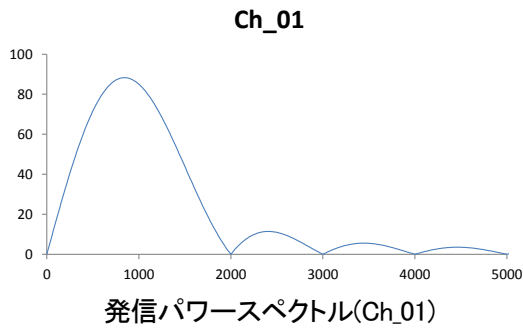


図 4.5-6 発信点センサ Ch_01, 受信点センサ Ch_08~14 におけるパワースペクトル

4.5.3 弾性波トモグラフィ手法によるグラウト充填率評価の検証結果と考察

図 4.5-7, 図 4.5-8, ならびに, 図 4.5-9 に, それぞれ数値解析による波動の伝播イメージ, 速度トモグラフィ, ならびに, 減衰トモグラフィによるシミュレーション結果 (コンター画像) を示す。

鋼製シース内のグラウト充填率が 0%, すなわち未充填の場合 (図 4.5-7(a)), 空隙部において波動が全反射するため, 波動は空隙部を回折して伝播することになるが, 回折した波線経路を伝播することによる伝播時間の遅れは計算上でも微小なものである。シミュレーションでは, 鋼製シースに遷移し伝播する波動により, 速度トモグラフィによる速度コンター画像において, 鋼製シース付近で速度が速くなる傾向が確認された (図 4.5-8(a))。しかし, この速度変化もわずかなものであり, 速度トモグラフィでは鋼製シースの位置

を特定することも困難であると考えられる。これに対し、減衰トモグラフィによるスペクトル減衰率のコンター画像では (図 4.5-9(a)), 回折による距離減衰の増加の影響が反映され、鋼製シースの位置において減衰率が大きいことが確認され、その差異は速度よりも明瞭であった。

グラウトが充填され走査線上の一体性が確保された場合 (図 4.5-7(b), (c)) は、波動は PC 鋼材などに遷移し、かつ最短となる直線経路を伝播することから、速度のコンター画像において充填率が高くなるにつれ鋼製シース付近の速度が速くなる傾向が確認された (図 4.5-8(b), (c))。一方、各部材は音響インピーダンスが異なることから、波動は一部が部材界面を移り伝播するとともに、一部は部材界面で反射し散乱する。スペクトル減衰率のコンター画像では、この波動の散乱減衰の増加の影響が反映され、鋼製シース付近における減衰率は、充填率 0% の場合よりも大きく示された (図 4.5-9(c))。また、鋼製シース付近における減衰率は、充填率 100% よりも充填率 50% の方が大きく示された (図 4.5-9(b))。これは、一部に空隙が存在することから、距離減衰と散乱減衰の双方の影響を複合的に反映したためと推察される。

以上の数値解析によるシミュレーション検証より、速度トモグラフィおよび減衰トモグラフィの両手法において、鋼製シース内のグラウト充填率に関連する傾向がそれぞれ確認された。またスペクトル減衰率を用いた減衰トモグラフィは速度トモグラフィよりも高感度にグラウト充填率を評価できる可能性が確認された。

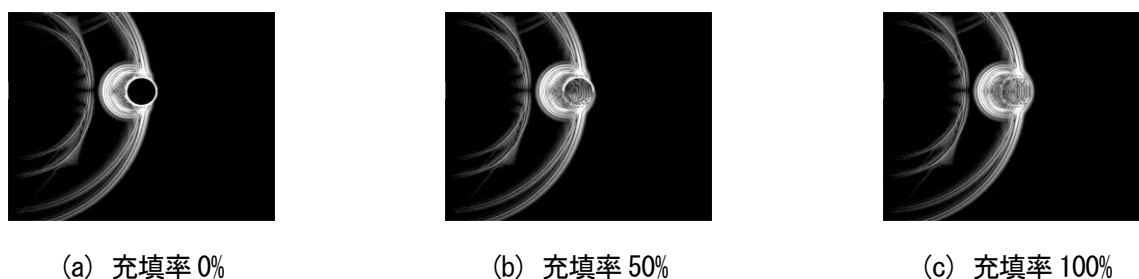


図 4.5-7 数値解析による波動伝播イメージ

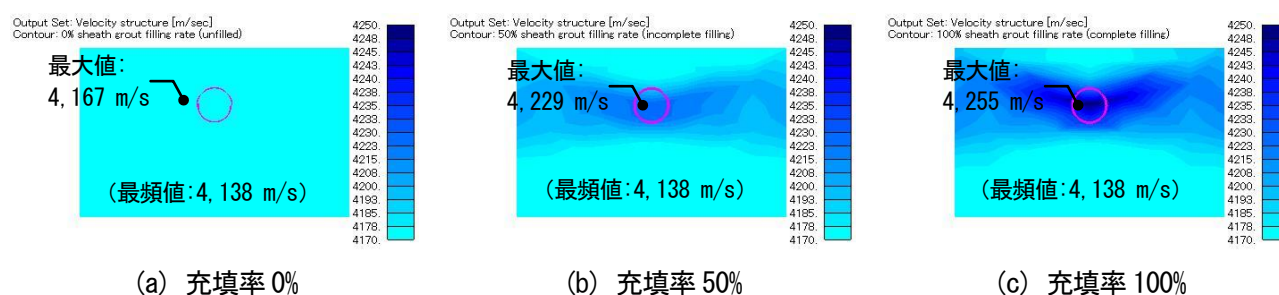


図 4.5-8 速度トモグラフィ法によるシミュレーション結果

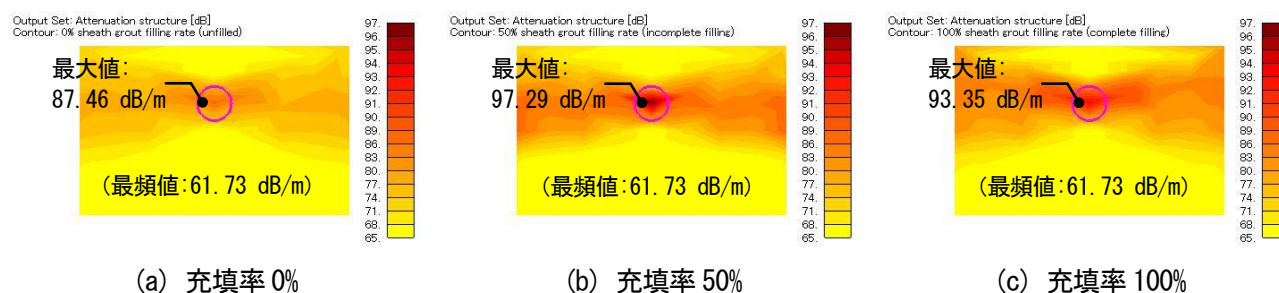


図 4.5-9 減衰トモグラフィ法によるシミュレーション結果

4.5.4 伝播速度とスペクトル減衰率の統合指標を用いたグラウト充填率評価へのアプローチ

数値解析によるシミュレーションにおいて、伝播速度およびスペクトル減衰率という二つの指標が、それぞれグラウト充填率に関連する傾向を示すことが確認された。伝播速度は変化が小さいものの、充填率の増減に対し線形の相関を有すると推察される。また、スペクトル減衰率の変化の傾向は、距離減衰と散乱減衰の複合的な作用によるものとなり、充填率の増減に対し線形の相関ではないと推察されるが、速度よりも高い感度で変化する。そこで、異なる傾向を有する二つの指標を同時に解釈する統合指標を用いた可視化手法²⁸⁾について検討を行った。図 4.5-10 に統合指標の概念を示す。まず、伝播速度およびスペクトル減衰率のそれぞれの結果（図 4.5-10(a), (b)）をもとにしきい値を設定する。そして、伝播速度とスペクトル減衰率の二軸で構成する平面上に各要素のデータをプロットし、しきい値を用いてデータを分類する（図 4.5-10(c)）。本研究では、それぞれの手法で確認された傾向をもとに、表 4.5-2 に示すように、未充填または充填不足が推察される状態をレベル 1～2、完全充填が推察される状態をレベル 5～6 とする六段階の分類を行い、その分類により要素を改め（図 4.5-10(d)）、新たなコンター画像で表した。

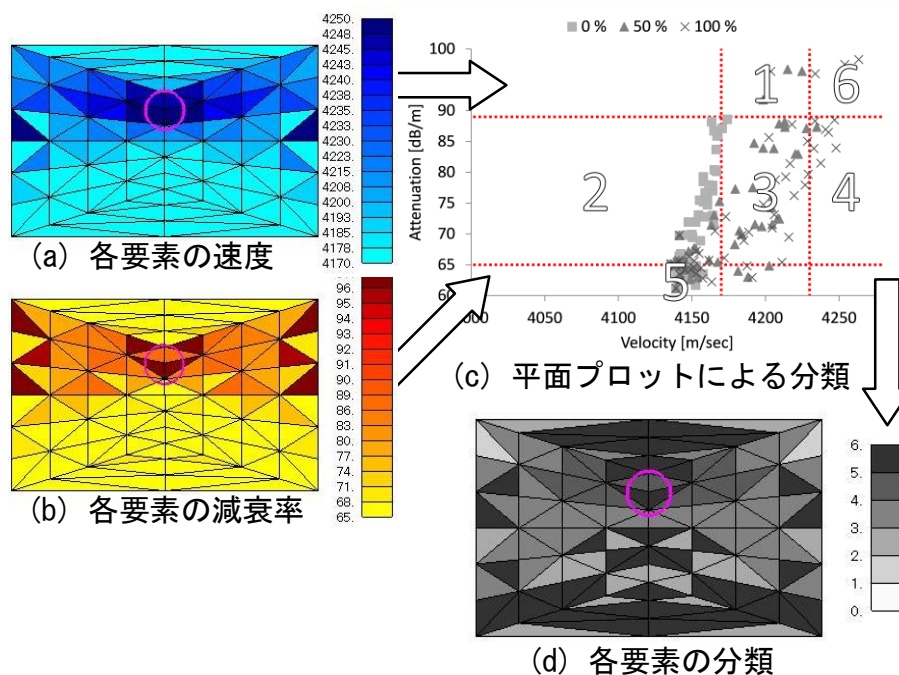


図 4.5-10 伝播速度とスペクトル減衰率の統合指標

表 4.5-2 それぞれの手法で確認された傾向による分類

		伝播速度		
		4,170 m/s 未満	4,170-4,230 m/s	4,230 m/s 以上
減衰率 スペクトル	89 dB/m 以上	レベル 2 【充填率 0%】	レベル 1 【充填率 50%】	レベル 6 【充填率 100%】
	65-89 dB/m		レベル 3	レベル 4
	65 dB/m 未満	レベル 5		

伝播速度とスペクトル減衰率の統合指標を用いたコンター画像を図 4.5-11 に示す。異なる傾向を示す伝播速度とスペクトル減衰率の統合指標により、それぞれを指標とするコンター画像とは性質の異なるコンター画像が得られている。ここで、鋼製シース部位のデータの傾向のみを基にしてしきい値を設定しているため、シース部位に係る要素のみに着目する。シース部位を拡大したコンター画像を図 4.5-12 に示す。充填率 0% では、未充填や充填不良が推察されるレベル 2 が支配的であり、充填率 100% では、完全充填が推察されるレベル 5 以上が大半を占めている。充填率 50% では、鋼製シース内でレベルによる評価が分かれる結果が示され、特異な状態が推察される。このように、鋼製シース内でグラウト充填率に伴う変化がシミュレーションした状態に対し調和的に表すことができ、伝播速度とスペクトル減衰率の統合指標を用いた可視化手法は、本検証におけるグラウト充填率の評価に対し有効であると考えられる。また、伝播速度およびスペクトル減衰率は弾性波測定で同時に得られる指標であり、PC 構造物に限らず、あらゆるコンクリート構造物または部材においても、この伝播速度とスペクトル減衰率の統合指標を用いた可視化手法は、合理的に健全性を評価するための判断材料として有効な手法であると考えられる。

しかし、統合指標を用いた可視化手法は、しきい値を適切に設定すること、二つの指標により表現される状態が何を表すかを想定することが重要であり、さらなる適用性の拡大のためには、今後、より多くのデータを蓄積していく必要がある。

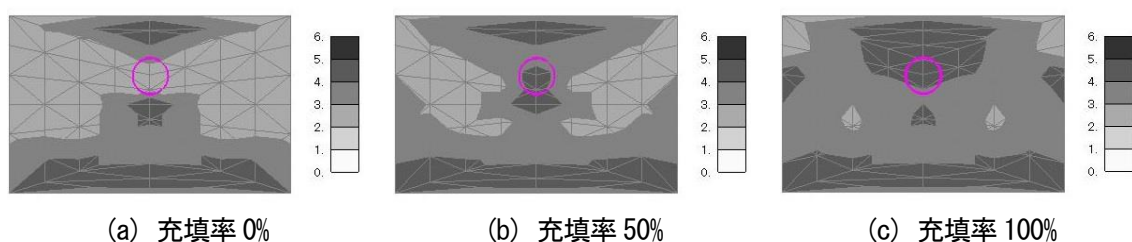


図 4.5-11 伝播速度とスペクトル減衰率の統合指標を用いたコンター画像

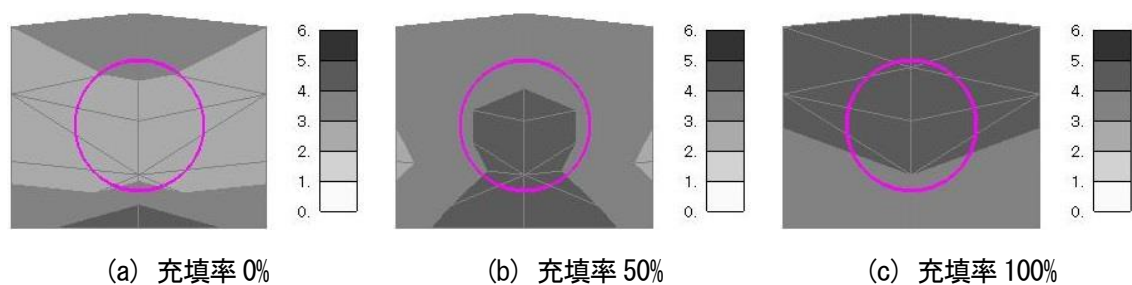


図 4.5-12 伝播速度とスペクトル減衰率の統合指標を用いたコンター画像（シース部位拡大）

4.6 まとめ

本章では、「健全性の評価精度の向上」の課題を検討した。ひび割れや空洞といった欠陥部が微細な場合にも健全性を高精度・高感度に評価できる指標として、従来使用されてきた弾性波伝播速度に代わる周波数のスペクトル減衰率とその評価方法を考案し、減衰トモグラフィ手法として提案した。また、提案手法の有効性を実構造物への適用結果から実証した。本章における結論を以下に示す。

- (1) 構造物内部の損傷度が大きくなるに従い、伝播速度に比べて振幅の減衰比が極めて顕著に低下すること

が基礎試験によりわかった。損傷に対してより感度の高いパラメータであるため、より微細な欠陥を検出できる可能性があることを示した。

- (2) 周波数依存性を考慮できるスペクトル減衰率を弾性波トモグラフィ手法に実装した減衰トモグラフィ手法を提案した。振幅の減衰特性によって構造物内部の損傷度を高感度に評価できる可能性を示した。
- (3) 減衰トモグラフィ手法をひび割れが発生した現場のコンクリート構造物に適用し、速度トモグラフィ手法に比べ、さらに高感度な評価が可能であることを示し、同手法の有効性を実証した。
- (4) PC 構造物の躯体であるコンクリート構造物の異常の検出と、シーす内の充填率の同時評価を行うために、PC 構造物に対して速度トモグラフィ手法と減衰トモグラフィ手法を同時に用いる手法を提案した。数値解析シミュレーション検証により、高感度な減衰トモグラフィ手法の充填率評価への有効性を示した。また、伝播速度とスペクトル減衰率の統合指標による可視化手法を適用することで、合理的に健全性を評価できる可能性も示した。

本章までで、センサを挟み込むことが可能な構造物に対して弾性波トモグラフィの有効性を示した。本研究における減衰トモグラフィ手法は、現状は定性的な特徴を高感度に把握する手法としての位置付けであるが、実証によりデータを蓄積し、得られた減衰率画像と対象コンクリート構造物の実態、さらには速度画像も合わせてデータベース化することで、物理的指標に関連付けた定量的かつ高感度な健全性評価も可能になると考えられる。

次章以降では、弾性波トモグラフィの適用性をさらに拡大させるために、センサ配置に対する制約を解決する研究について論ずる。

第 4 章の参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書および第 2 回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ，No. 73，2008.
- 2) 榊原淳一，米沢洋：高周波数の波の振幅減衰を用いた構造物の非破壊診断，JFE 技報，No. 27，pp. 37-41，2011.
- 3) 木下繁夫，大竹政和：強震動の基礎－4.2.5 地震波の減衰（その 1）－，
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/gk/publication/1/1-4.2.5.html>（2014.9.26 閲覧）
- 4) Aggelis, D. G., Tomoki, S. and Shouhei, M.: Frequency Dependency of Elastic Wave in Cement-Based Materials with Artificial Damages, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集，V-006，pp. 11-12，2007.
- 5) 桃木昌平，塩谷智基，小林義和：「減衰トモグラフィ」で高精度に構造物の健全性を診断，検査技術，Vol. 15，No. 9，pp. 39-43，2010.
- 6) 桃木昌平，塩谷智基，小林義和：弾性波トモグラフィ法による PC 構造物の健全性評価に関する研究，プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，Vol. 23，pp. 461-466，2014.
- 7) 木村耕蔵，渡辺健，橋本親典，大津政康：超音波法による断面修復した鉄筋コンクリートの欠陥検出お

- よび鉄筋の影響に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 2149-2154, 2009.
- 8) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 竹内則雄: 微細ひび割れの形成・連結・開閉に起因した準脆性材料の破壊進行メカニズム, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 3, pp. 505-515, 2010.
 - 9) 桃木昌平, 蔡華堅, 塩谷智基, 小林義和: 弾性波減衰特性を用いたコンクリート内部損傷可視化技術の開発, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, V-195, pp. 387-388, 2009.
 - 10) 渡辺俊樹, 佐々宏一: 弾性波の初動振幅を利用した減衰トモグラフィ, 物理探査, 第 45 巻, 第 1 号, pp. 10-21, 1992.
 - 11) 渡辺俊樹, 佐々宏一: 弾性波の初動波形形状を用いた減衰特性の推定とそのトモグラフィへの応用, 物理探査, 第 46 巻, 第 1 号, pp. 25-35, 1993.
 - 12) Youli, Q. and Jerry, M. H.: Seismic attenuation tomography using the frequency shift method, GEOPHYSICS, Vol. 62, No. 3, pp. 895-905, 1997.
 - 13) 渡辺俊樹, Kurt T. N., Seiji N. and Larry R. M.: 周波数領域波形インバージョンによる孔間データの速度と減衰のイメージング, 物理探査, 第 56 巻, 第 2 号, pp. 97-105, 2003.
 - 14) Satoru F. and Ahyi K.: P wave attenuation structure by spectral inversion of seismic waveforms, 物理探査, 第 58 巻, 第 6 号, pp. 617-629, 2005.
 - 15) 榊原淳一, 山本督夫: 高周波の弾性波を用いた高精度地盤調査手法の開発, 土木学会論文集 C, Vol. 65, No. 1, pp. 97-106, 2009.
 - 16) M Schuller, M Berra, R Atkinson and L Binda: Acoustic tomography for evaluation of unreinforced masonry, Construction and Building Materials, Vol. 11, No. 3, pp. 199-204, 1997.
 - 17) Lanbo L. and Tieshuan G.: Seismic non-destructive testing on a reinforced concrete bridge column using tomographic imaging techniques, Journal of Geophysics and Engineering. Vol. 2, pp. 23-31, 2005.
 - 18) Francois S. P., Patrice R. and Gerard B.: Measurement of alkali-silica reaction progression by ultrasonic wave attenuation, Cement and Concrete Research, Vol. 37, pp. 948-956, 2007.
 - 19) Chai, H. K., Aggelis, D. G., Momoki, S., Kobayashi, Y. and Shiotani, T.: Tomographic reconstruction for concrete utilizing attenuation of ultrasound, NDT & E International, Vol. 44, No. 2, pp. 206-215, 2011.
 - 20) IUPAC Gold Book: Beer-Lambert law, <http://goldbook.iupac.org/B00626.html>, 2014.
 - 21) 塩谷智基, Aggelis, D. G., 桃木昌平: 弾性波トモグラフィによるコンクリート構造物の健全性評価技術, とびしま技報, No. 56, pp. 11-116, 2007.
 - 22) Sassa, K., Ashida, Y., Kozawa, T. and Yamada, M.: Improvement in the Accuracy of Seismic Tomography by use of an Effective Ray-Tracing Algorithm, MIJ/IMM Joint Symposium Volume Papers, pp. 129-136, 1989.
 - 23) 小林和夫, 宮川豊章, 杉江功, 森拓也: PC 構造物のグラウト不良とその補修のための注入材料に関する実験, プレストレスコンクリート, Vol. 36, No. 3, pp. 75-81, 1994.
 - 24) 中川義規, 三上貴之: 近江大橋 (旧橋) における主桁の調査と補修状況の報告 ～PC 橋に学ぶ～, 平成 24 年度近畿地方整備局研究発表会論文集, 防災・保全部門, No. 23, pp. 1-5, 2012.
 - 25) 土木研究所橋梁構造研究グループ: PC 橋のグラウト充填の確認方法に関する研究, 平成 21 年度土木研究所成果報告書, No. 46, 2009.
 - 26) 鎌田敏郎, 浅野雅則, 川島雅道, 内田慎哉, 六郷恵哲: 弾性波による PC グラウト充填評価手法の実構

造物への適用, 土木学会論文集 E, Vol. 62, No. 3, pp. 569-586, 2006.

27) 国土交通省：道路統計年報 2013, <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/> (2014.4.25 閲覧)

28) 土木学会コンクリート委員会：コンクリートの非破壊評価技術の信頼性向上に関する研究小委員会(339 委員会)(第Ⅱ期)報告書ならびにシンポジウム講演概要集, コンクリート技術シリーズ, No. 100, 2012.

第5章 表面波を用いた一面配置型弾性波トモグラフィ手法に関する研究

5.1 はじめに

従来の弾性波トモグラフィでは、打撃などの外力により生じた実体波の透過弾性波を利用することから、計測対象のコンクリート構造物を挟み込むようにセンサを配置することが必要である。このことは、第3章、および第4章で提案した弾性波トモグラフィ手法も例外ではない。そのため、トンネル覆工コンクリートやその背面、および橋梁床版、擁壁のようにセンサ配置が片側表面に制限されるコンクリート構造物には適用が困難であった。

本章では、第2章で述べた弾性波トモグラフィ手法における「③適用範囲の拡大」の課題を解決するため、波長に相当する深度までの媒質の状態に影響を受ける表面波（レイリー波）¹⁾に着目し、この表面波の特性を利用することで、片側表面から従来の弾性波トモグラフィのように広域的に構造物内部の健全性を評価できる一面配置型弾性波トモグラフィ手法を提案する^{2), 3)}。本章では、一面配置型弾性波トモグラフィ手法で用いる、受信波形を基に得られる表面波位相速度によるトモグラフィ解析方法を提案する。また、模擬欠陥を有する試験体に対する検証実験結果と現場における適用事例を示し、本手法の有効性を検証する。

5.2 表面波を用いた一面配置型弾性波トモグラフィ手法の提案

5.2.1 使用する弾性波の種類

構造物の表面を鋼球などで打撃した場合に励起される弾性波は、波の振動方向や進行方向によって実体波や表面波に分類される⁴⁾。実体波の特徴の一つは速度分散がないこと、つまり波動の伝播速度が振動数に依存しないことがある。縦波（P波）や横波（S波）は実体波に分類され（図5.2-1(a), (b)）、従来の弾性波トモグラフィでは、縦波の伝播速度が使用されていた。この伝播速度は、発信点から受信点を結ぶ走査線の媒質の特性に影響を受けることから、弾性波トモグラフィを行う場合には診断する構造物を挟み込むように発信点と受信点を設置する必要があった。

したがって、片側表面から従来の弾性波トモグラフィのように構造物内部の状況进行评估するためには、縦波以外の弾性波の伝播速度をトモグラフィに適用する必要がある。そこで本研究では、表面波の中でも、表面に鉛直で楕円状に振動しながら伝播する特徴を有する表面波（レイリー波、図5.2-1(c))に着目した。

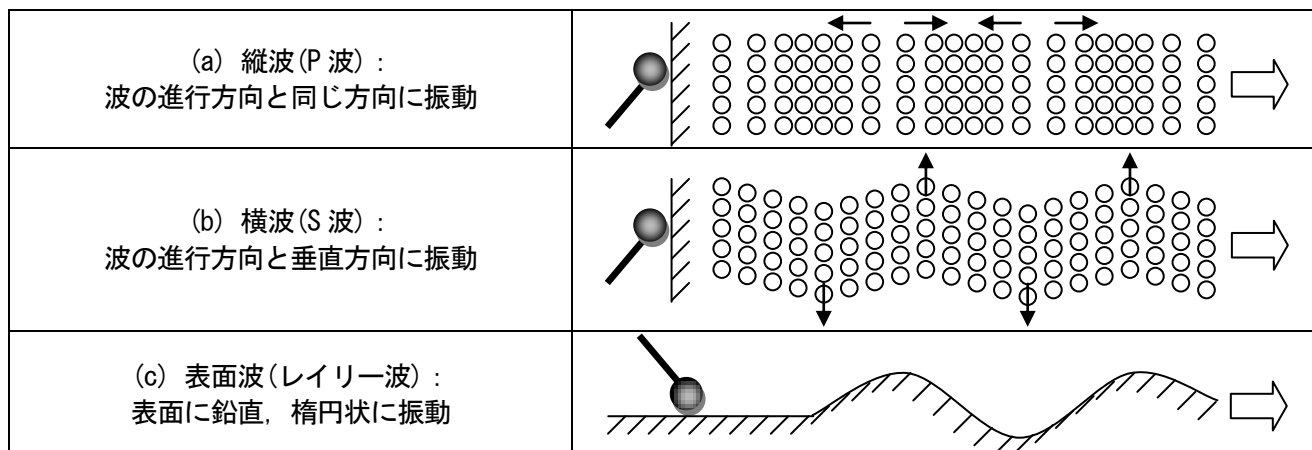
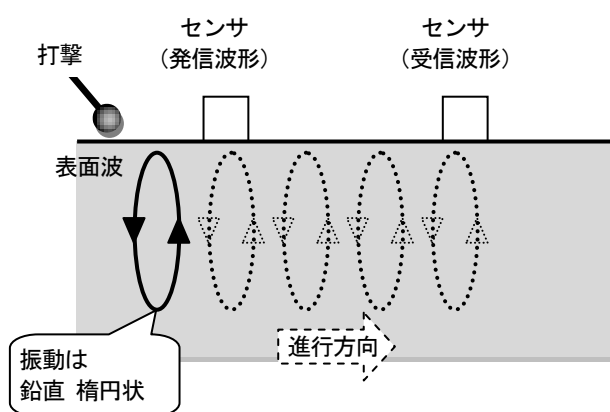
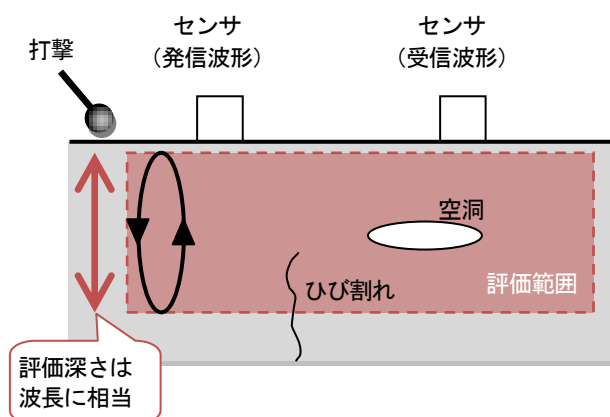


図 5.2-1 弾性波の種類と波の進行方向に対する振動⁴⁾

レイリー波（Rayleigh 波）は表面近傍で楕円状に振動しながら伝播する（図 5.2.2(a)）。この楕円状の振動の影響深度は表面波の波長に等しく、表面波は波長に相当する深さ方向の状態に応じて変化を示す特性を有する⁵⁾。つまり、走査線に深さが加わる表面波の振動範囲（図 5.2.2(b)，以後、評価範囲と呼ぶ）にひび割れや空洞などの欠陥部が存在する場合、それにより反射または散乱するため、表面波の波動に乱れが生じることになる。この乱れを利用することにより、片側表面のセンサ配置から構造物内部の状態を評価できると考えた。また、表面波は構造物の表面を伝播することから減衰しにくく、縦波（P 波）や横波（S 波）に比べて振動エネルギーが大きいいため、P 波、S 波を用いるよりも広い範囲の計測が可能であるという特徴も有している。



(a) 表面波の振動と進行方向



(b) 表面波の評価範囲

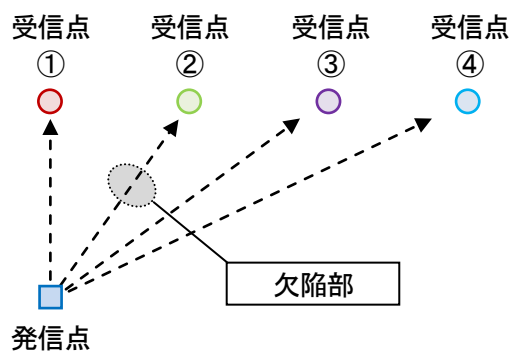
図 5.2-2 表面波の特性と構造物内部の評価のイメージ

図 5.2-3(a)に平面的な発信点と受信点との位置関係を、図 5.2-3(b)に発信点近傍と受信点で計測された波形の一例を示す。発信点と受信点②の間の表層部には、たたきによる検査（打音検査）において異音が確認されており、欠陥部（空洞・浮き）が存在していることが推察されていた。

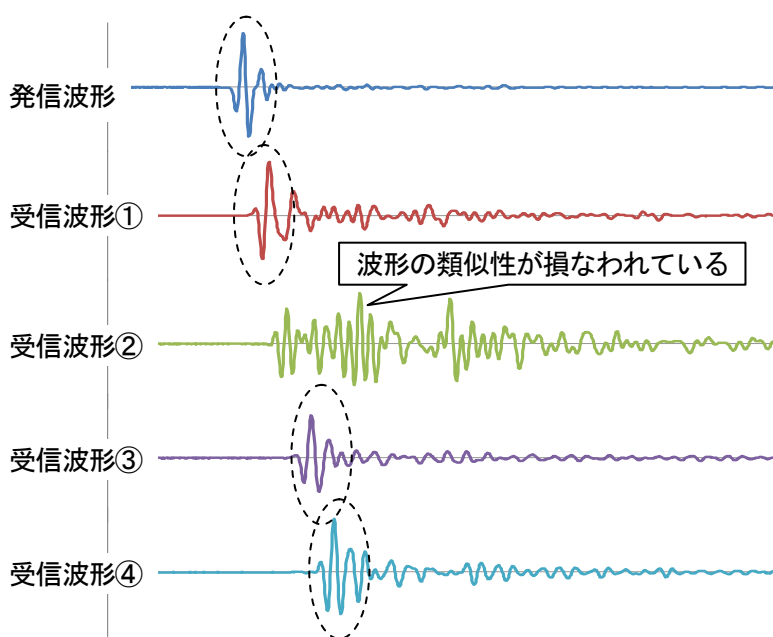
前述のように、表面波は減衰が小さいという特徴を持っているため、走査線間の距離が長くなっているにも関わらず、受信点②を除き計測波形には類似性が見られる。一方、走査線間に損傷が存在する受信点②の波形は、損傷に起因する反射や散乱の影響を受け、継続時間や包絡形状も含め、他の波形に見られる類似性

が失われている。

ここで、構造物内部の損傷による表面波の乱れの影響を把握する指標として表面波位相速度を適用する。表面波位相速度は、走査線間における表面波の卓越周波数をそれぞれ求め、その位相差より算出する。そして、従来の走時トモグラフィで用いられている同時反復再構成法（SIRT）⁹⁾を適用して、弾性波トモグラフィ手法により表面波位相速度画像を求める。なお、表面波位相速度の妥当性については次項で説明する。



(a) 発信点と受信点との平面的位置関係



(b) 発信点と受信点での計測波形

図 5. 2-3 コンクリート構造物の表面を打撃した場合の表面波の伝達状況（イメージ）

5. 2. 2 表面波位相速度のトモグラフィへの適用性

評価範囲にひび割れや空洞などの欠陥が存在する場合、レイリー波は反射、または散乱するため、伝播経路は最短距離の直線にならない。その結果、表面波の初動、あるいは位相が遅れ、受信点まで長い伝播時間を要することになり、伝播経路を直線と仮定して計算すると伝播速度は低下することになる。地盤工学分野（ジオトモグラフィ）では既に、地震波を各地に設置された地震計により測定し、表面波位相速度をトモグ

ラフィ解析に適用して、広範囲における地質の分布や異方性を把握する方法として用いられている⁷⁾¹¹⁾。したがって、対象をコンクリート構造物として、構造物の片側表面に配置されたセンサで収録した波形データから、表面波の卓越周波数に応じた伝播速度（表面波位相速度）を算出してトモグラフィ解析に適用することで、アプローチが片側表面に制限される構造物においても内部または背面側の健全性を広域的に評価できると考えられる。

このとき、卓越周波数から求められる波長に相当する深さが、表面波の最大評価深さと考えられる。表面波位相速度は式（5.2-1）によって求められる。

$$V_{ph} = \lambda f = \left(\frac{2\pi\Delta x}{\Delta\phi} \right) f \quad (5.2-1)$$

ここで、 V_{ph} は表面波位相速度（m/s）、 λ は波長（m）、 f は表面波の卓越周波数（Hz）、 Δx は走査線間距離（m）、 $\Delta\phi$ は走査線間の卓越周波数に応じた位相差（radian）を示す。

しかしながら、実際に計測される波形データ（図 5.2-4）から卓越周波数を求める場合、図 5.2-5 に示すように表面波の周波数成分以外にも構造物境界面からの反射や回折による周波数成分が混在すると考えられる。そこで本研究では、まず波形を表面波の理論的な伝播速度（例えば、コンクリートのポアソン比を 0.18 とした場合、表面波の伝播速度は縦波伝播速度の約 57% となる¹²⁾）により大まかに絞り込み、次いで、相互相関分析において類似性が最も高いと判断された部分を、表面波が卓越していると考えられる波形として抽出し（図 5.2-6）、抽出された波形の周波数成分（図 5.2-7）から表面波位相速度を算出する。

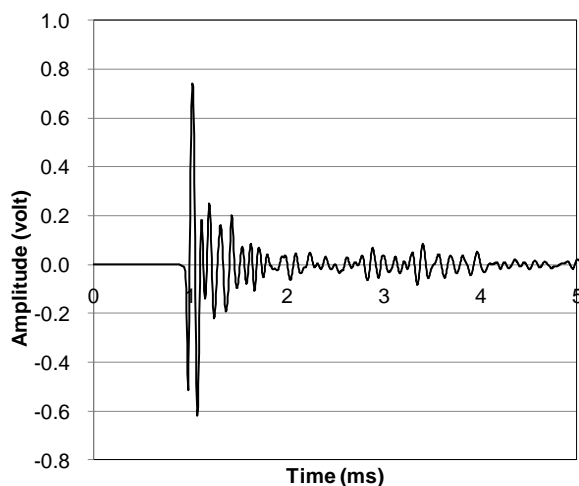


図 5.2-4 実測波形データ

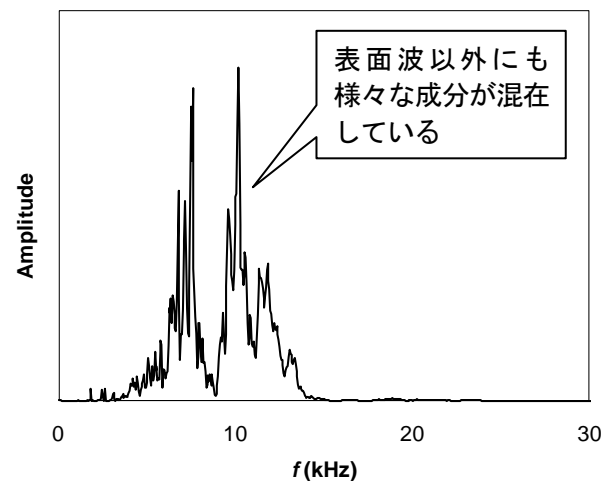


図 5.2-5 実測波形データの周波数分布

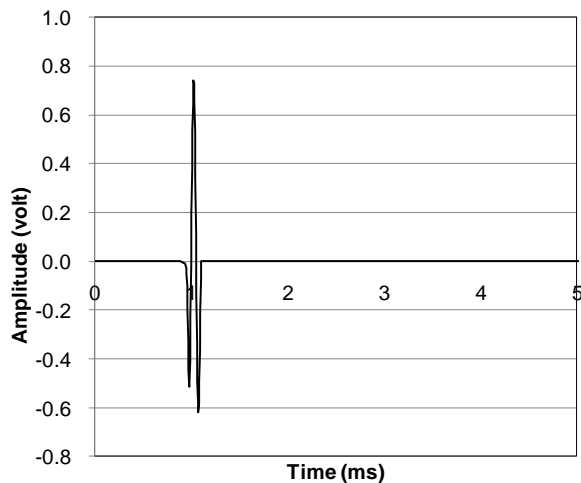


図 5.2-6 表面波の抽出波形データ

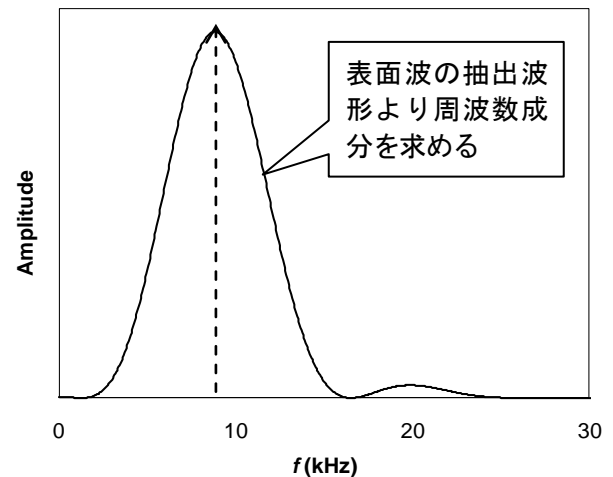


図 5.2-7 抽出波形データの周波数分布

5.3 模擬欠陥試験体による提案手法の検証

5.3.1 試験体の概要と計測方法

写真 5.3-1 に提案した一面配置型弾性波トモグラフィ手法の検証に用いるコンクリート試験体のコンクリート打設前の型枠組立状況を示す。試験体はコンクリート床版を想定し、寸法（ $L \times W \times D$ ）を 1,500 mm × 1,500 mm × 300 mm とした。水平方向のひび割れや空洞などの欠陥を模擬した直径 300 mm、厚さ 5 mm の発泡スチロール板を 4 箇所に埋設しコンクリートを打設した。発泡スチロール板の設置深度は、センサを配置する面からそれぞれ 30 mm, 60 mm, 100 mm, 140 mm とした。

弾性波を計測するセンサは圧電型加速度センサ（SAF51、富士セラミックス社製、共振周波数 45 kHz）を用いた。端部からの反射波の影響を低減するため、試験体の端部からセンサ間隔と同じ距離だけ離して 4 行 4 列、計 16 個配置した。センサ間隔は 300 mm である。センサの設置状況を写真 5.3-2 に示す。

弾性波は鋼球を先端に取り付けたハンマ（以下、鋼球ハンマ）によって各センサの近傍に打撃を与えて励起させる。このとき、近傍のセンサで得られた波形を発信波形、残り 15 個のセンサで得られた波形を受信波形とする。この打撃を全てのセンサ近傍で実施し、 $16 \times 15 = 240$ 本の走査線を得る。図 5.3-1 に走査線を示す。このようにして、評価する領域を網羅する多数・多方向の各走査線における表面波位相速度を算出し、それらを基にトモグラフィ解析によって表面波位相速度の画像を算出する。

鋼球での打撃によって励起される弾性波の周波数は、鋼球の直径（球径）、および打撃されるコンクリート表面の状態（弾性係数）に影響を受けることが知られている¹³⁾。本検証試験では、3 種類の鋼球ハンマ（球径 3 mm, 8 mm, 11 mm）を用いて、実際に得られる発信波形から抽出した表面波に対して高速フーリエ変換（FFT）解析を行い、表面波の卓越周波数を求め波長を算出した。

図 5.3-2、図 5.3-3、図 5.3-4 に鋼球ハンマで得られた抽出波形のパワースペクトルを示す。パワースペクトルから卓越周期を読み取り波長を算出する。表 5.3-1 に表面波の卓越周期と波長を示す。表面波の波長と同程度の深さまでが探査可能と考ええると、球径 11 mm の鋼球ハンマで打撃した場合には全ての模擬欠陥の検出が可能と考えられるが、球径 3 mm の鋼球ハンマで打撃した場合には深い位置にある模擬欠陥、特に写真 5.3-1 で示す左下の深さ 140 mm に位置する模擬欠陥の検出は困難と想定される。

表 5.3-1 鋼球ハンマで励起された表面波の卓越周期と波長

球径(mm)	卓越周期(kHz)	波長(mm)
3	20	110
8	12	180
11	9	240

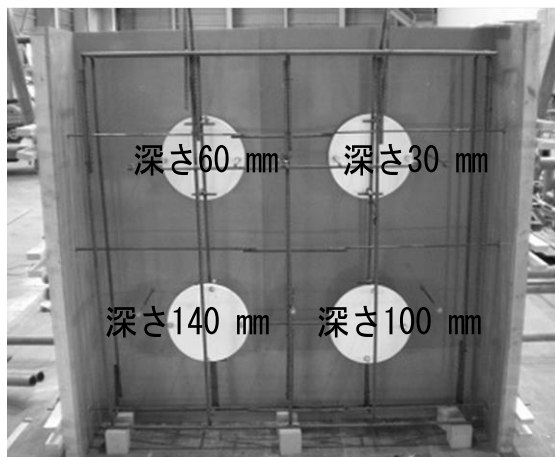


写真 5.3-1 試験体型枠組立状況

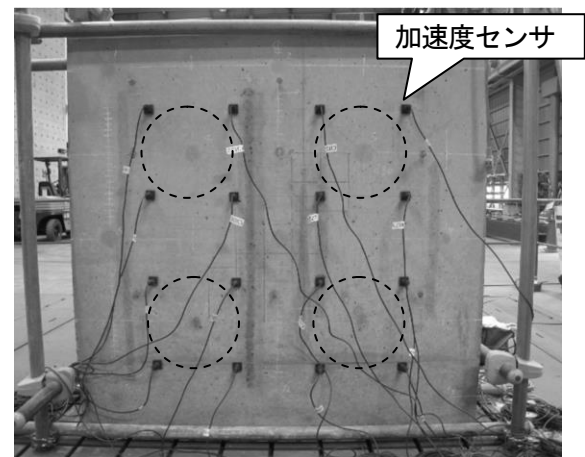


写真 5.3-2 センサ配置状況（破線は模擬欠陥部位）

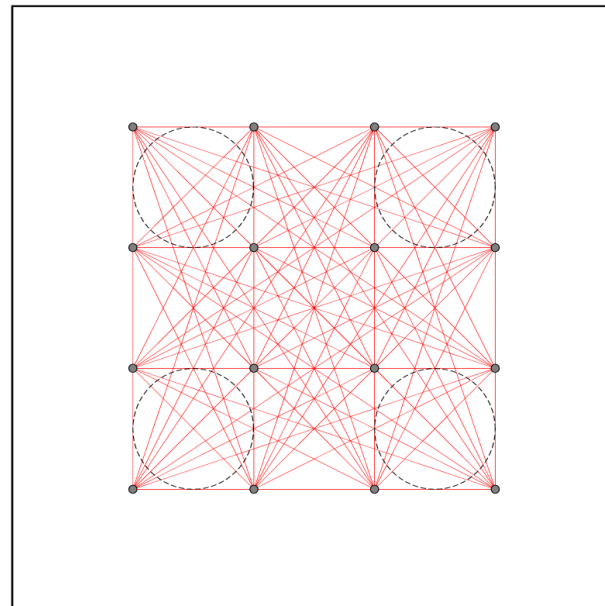


図 5.3-1 模擬試験体における全走査線（破線は模擬欠陥部位）

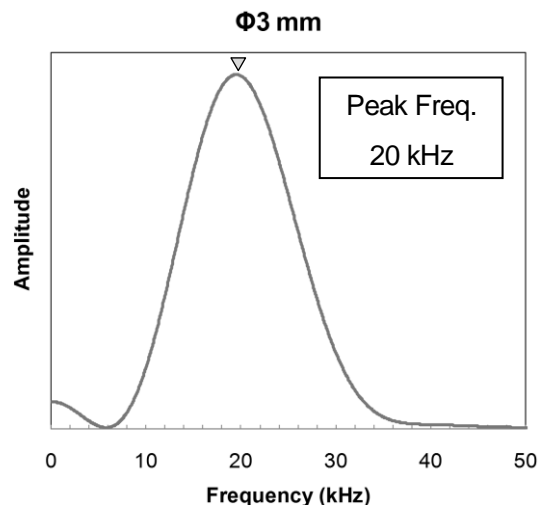


図 5.3-2 表面波の周波数分析結果（鋼球径 3 mm）

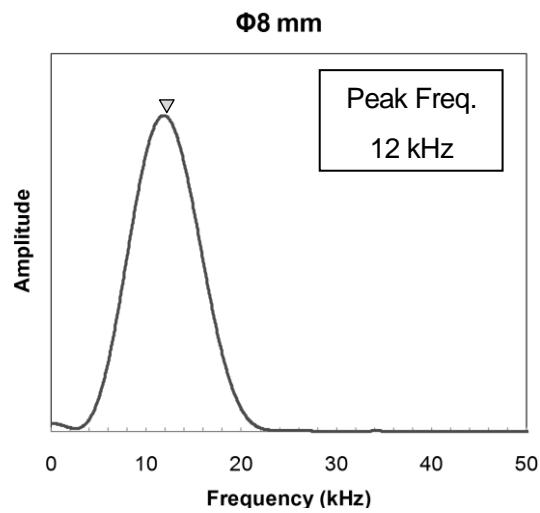


図 5.3-3 表面波の周波数分析結果（鋼球径 8 mm）

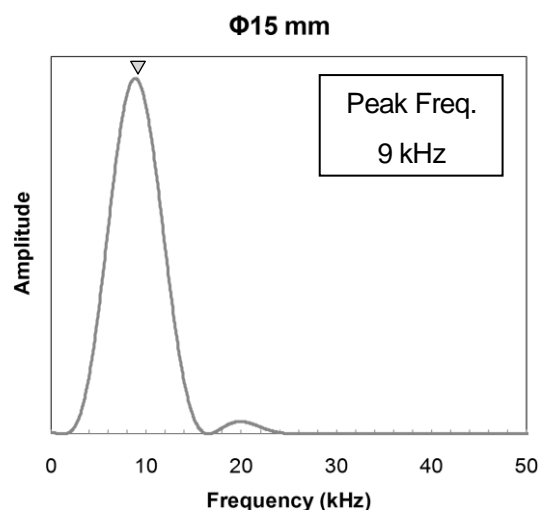


図 5.3-4 表面波の周波数分析結果（鋼球径 11 mm）

5.3.2 検証結果と考察

各鋼球ハンマによる打撃において各計測点で計測された波形に基づき、トモグラフィ解析によって表面波位相速度を算出し、模擬欠陥部の検出を実施する。図 5.3-5、図 5.3-6、図 5.3-7 に球径 3 mm、8 mm、11 mm の鋼球で打撃した場合の表面波位相速度の画像を示す。

球径 3 mm の鋼球で打撃した場合、励起される表面波の波長よりも浅い位置に設置された深さ 30 mm と 60 mm の模擬欠陥部の周囲はその他の領域に比べ表面波位相速度が大幅に低下している。一方、励起される表面波の波長よりも深い位置に設置された深さ 140 mm の模擬欠陥部の周辺の表面波位相速度には低下が見られていない。

球径 8 mm の鋼球で打撃した場合、深さ 30 mm と 60 mm の模擬欠陥部に加え、深さ 100 mm の模擬欠陥部の周辺領域も表面波位相速度が大幅に低下している。さらに深さ 140 mm の模擬欠陥部の周辺についても、それ以外の模擬欠陥部周辺に比べると表面波位相速度の低下は明瞭ではないものの、球径 3 mm の鋼球で打撃した場合（図 5.3-4）に比べると表面波位相速度の低下が見られる。

球径 11 mm の鋼球で打撃した場合、励起される表面波の波長は 240 mm と全ての模擬欠陥の設置深度を大幅に上回ることから、模擬欠陥部の周辺の表面波位相速度が低下している。

以上の結果より、本論文で提案した表面波の位相速度を用いた一面配置型弾性波トモグラフィ手法によって、片側表面だけのセンサ配置で構造物内部の健全性評価が可能であることが示唆された。また、欠陥の検出可能深度は励起される表面波の波長に依存すること、確実に欠陥を検出するためには、欠陥の深度と同程度以上の波長を有する表面波を励起させる必要があることなどが明らかとなった。

今回の実験は、30cm 厚さのコンクリート構造物に対する検証であるが、実構造物でのさらなる適用範囲の拡大を考えると、より厚い構造物に対する有効性の検証を進める必要がある。

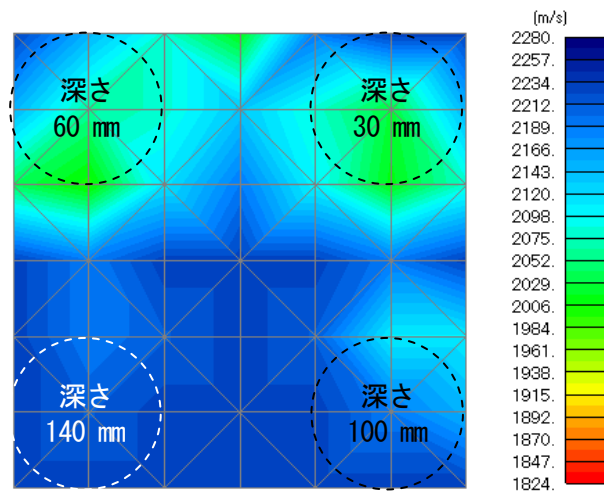


図 5. 3-5 表面波位相速度画像（鋼球径 3 mm）

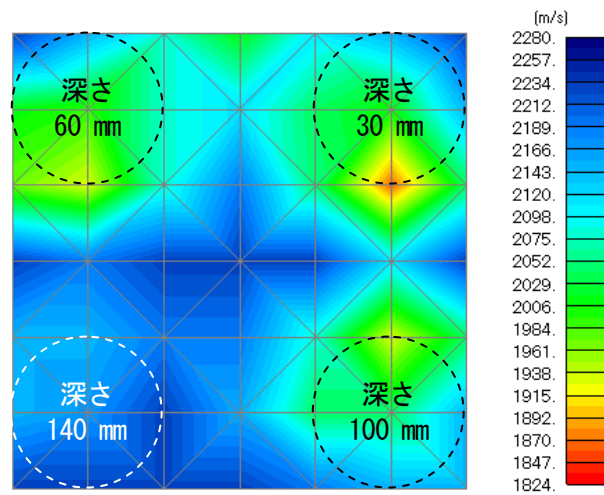


図 5. 3-6 表面波位相速度画像（鋼球径 8 mm）

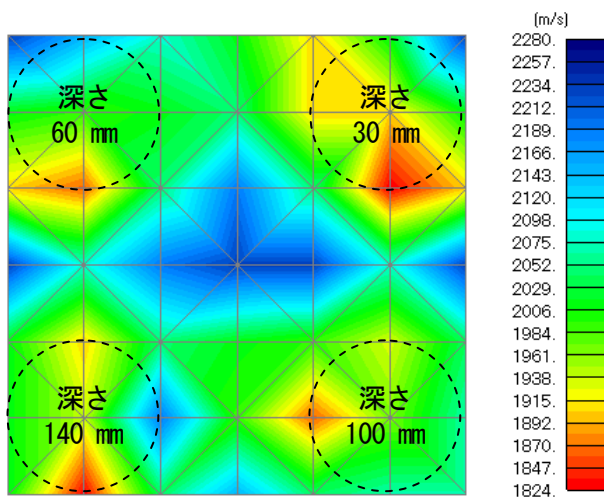


図 5. 3-7 表面波位相速度画像（鋼球径 11 mm）

5.4 一面配置型弾性波トモグラフィ手法の適用事例

これまでの検討において、従来の弾性波トモグラフィで使用する実体波（縦波）の伝播速度に代わり、深さ方向の情報を有する表面波（レイリー波）の位相速度を指標とすることにより、検査対象のコンクリート構造物の片側だけで損傷調査が可能な一面配置型弾性波トモグラフィ手法が可能であることを示した。ここでは、提案した一面配置型弾性波トモグラフィ手法を用いたコンクリート構造物の健全性調査（水平方向欠陥と鉛直方向欠陥を持つ模擬試験体）の検討結果を示す。

5.4.1 背面側の劣化状況の評価へのアプローチ

センサを設置する反対側の面に水平方向欠陥（豆板）と、鉛直方向欠陥（鉛直ひび割れ）がある場合を想定し、模擬試験体を用いて欠陥部の検出を試みる。

試験体の寸法は 1,200 mm(L)×1,200 mm(W)×300 mm(D)であり、コンクリート床版を想定している。試験体の背面側（センサの設置および打撃面の反対側）には豆板やひび割れを模擬した欠陥部がある。豆板は、表面から 200～300 mm の背面側位置に配置（φ300 mm）し、ひび割れは表面から 200～300 mm の位置に、幅 0.5 mm、長さ 550 mm を配置した。写真 5.4-1 に試験体背面の欠陥状況を示す。

センサは圧電型加速度センサ（SAF51、富士セラミックス社製、共振周波数 45 kHz）を用いた。健全である対面側表面に 4 行 4 列、計 16 個設置した。センサ間隔は 300 mm である。センサ設置位置と欠陥部との関係を図 5.4-1 に示す。図中の#01～#16 がセンサ設置位置である。打撃により表面波を励起させ、表面波位相速度を算出してトモグラフィ解析を行った。当計測で励起した表面波の波長は約 250 mm である。

トモグラフィ解析の結果から得られた表面波位相速度の画像を図 5.4-1 に示す。淡色部が健全な表面波位相速度に対し低下が見られた箇所であり、背面側の豆板やひび割れの位置と概ね合致していた。

ここで、配置したセンサを用いて一般的な衝撃弾性波法である多重反射法¹⁴⁾により床版の見かけ厚さを推定した。多重反射法による厚さは式 (5.4-1) により求める。

$$T = \frac{V_p}{2f} \quad (5.4-1)$$

ここで、 T は厚さ (m)、 V_p は縦波伝播速度 (m/s)、 f は波形データのピーク周波数 (Hz) を示す。

図 5.4-2 に多重反射法により各センサの波形データから得られた周波数分布を示す。ほとんどのセンサで計測された波形のピーク周波数は 5.5～6.0 kHz であるのに対して、模擬欠陥（豆板）の直上にあるセンサ（#06）で計測された波形のピーク周波数は 6.5～7.0 kHz と高周波数側に移行している。

健全部の縦波伝播速度を V_{ph} 、欠陥部の縦波伝播速度を V_{pd} とすると、 V_{ph} と V_{pd} には式 (5.4-2) のような関係が成立する。

$$V_{ph} > V_{pd} \quad (5.4-2)$$

健全部で計測されたピーク周波数 (f_h) と模擬欠陥部で計測されたピーク周波数 (f_d) との関係は前述のように式 (5.4-3) となる。

$$f_h < f_d \quad (5.4-3)$$

そのため、健全部の見かけの厚さ (T_h) と模擬欠陥部までの見かけの厚さ (T_d) の関係は式 (5.4-4) のようになり、模擬欠陥部までの見かけの厚さは健全部の床版厚さに比べて薄くなっていることが認められた¹⁵⁾。

$$T_h = \frac{V_{ph}}{2f_h} > T_d = \frac{V_{pd}}{2f_d} \quad (5.4-4)$$

多重反射法は、内部または背面側の劣化位置や、表面からの厚さまたは欠陥までの深さを定量的に評価するのに有効な非破壊評価技術である。ただし、基本的には打撃を実施した点の直下の評価となることから、広域的に調査を実施する場合は、計測領域において高密度に多数の点で測定する必要があるが、この事例のように、一面配置型弾性波トモグラフィによって、予め広域をスクリーニング調査し、多重反射法や他の詳細検査手法（コア採取やX線調査など）を要する箇所を絞り込むことで、比較的大規模なコンクリート構造物の調査を、より効率的に実施できると考えられる。

このように、表面波は鉛直・楕円状に振動しながら進行方向に伝播するものであるため、鉛直方向のひび割れや水平方向に広がる豆板等の欠陥が存在する場合、欠陥での反射や散乱により、受信波形の位相（継続時間や包絡形状）が乱れ、算出される位相速度が低下することから、欠陥として評価が可能となる。今回用いた表面波の波長は約 250 mm であることから、奥行き 200～300 mm 位置にある水平方向の欠陥、および鉛直方向の欠陥も認識できていることがわかる。ただし、適用範囲を拡大するためには、波長と欠陥の方向や規模に関して、今後さらに検証を進めていく必要がある。

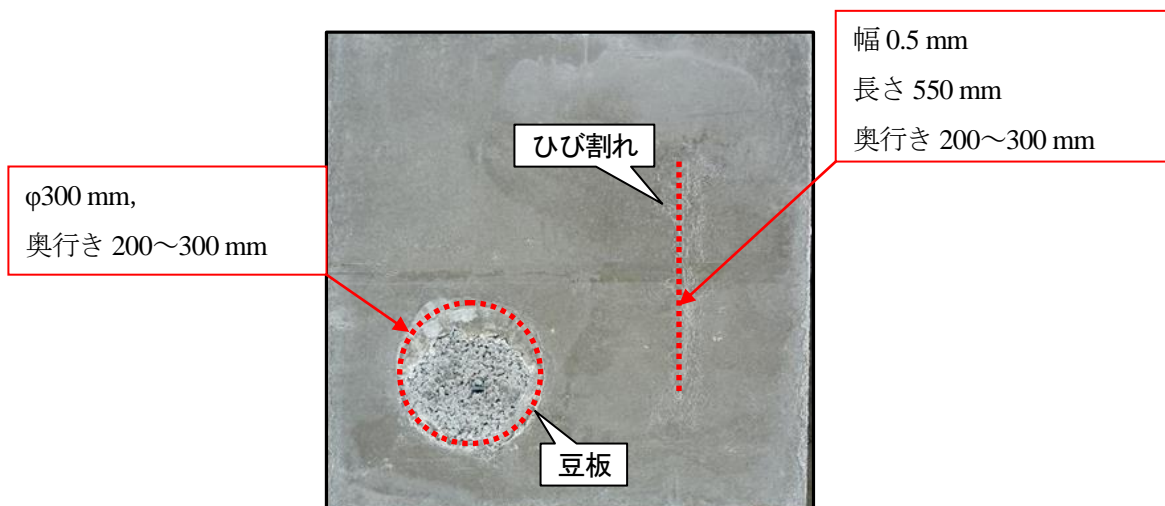


写真 5.4-1 背面劣化試験体

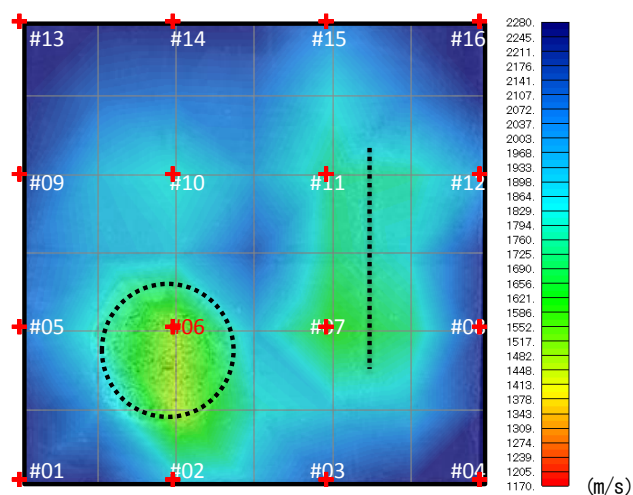


図 5. 4-1 トモグラフィ結果（+：センサ位置）

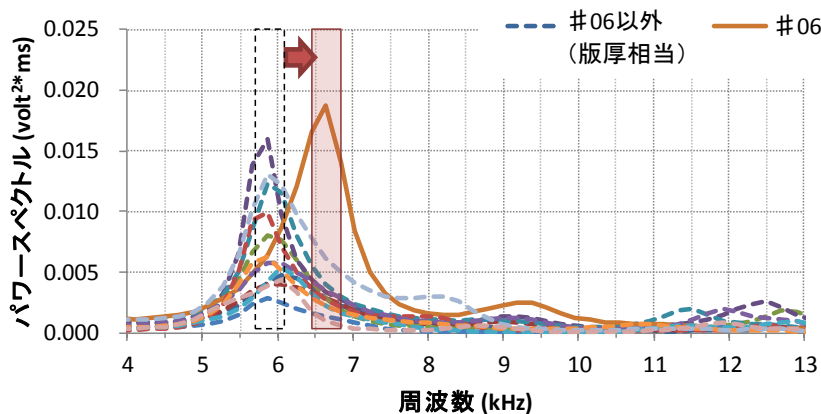


図 5. 4-2 波形データの周波数分布

5. 4. 2 断面修復工法の施工品質の評価へのアプローチ

弾性波トモグラフィによる健全性評価は、前項のような欠陥部の抽出という役割以外にも、欠陥部を補修した後の補修効果の確認にも適用可能である。ここでは、橋梁床版下面の断面修復工法によるリニューアル工事において、その施工品質の確認に一面配置型弾性波トモグラフィ手法を適用した事例を示す。

図 5. 4-3 に当該補修工事における一面配置型弾性波トモグラフィ手法の適用時のセンサ配置を示す。断面修復部の解放面（下面）にセンサを配置し、一方向からの弾性波トモグラフィを実施する。センサは圧電型加速度センサ（SAF51，富士セラミックス社製，共振周波数 45 kHz）を用いた。対面側表面に 4 行 4 列，計 16 個設置した。センサ間隔は 500 mm である。

通常，断面修復工法によるリニューアル工事を施工した場合，写真 5. 4-2 に示すように，施工範囲の任意の箇所において付着強度試験を行い，母材層と断面修復層との界面の付着状況を定量的に確認する¹⁶⁾。しかしながら，断面修復が施工された表面は一様であり，付着強度試験を実施する箇所を選定する動機付けが得られず，また，付着強度試験は破壊をとるため多点で実施することはできない。したがって施工品質の評価は局所的とならざるを得ない。

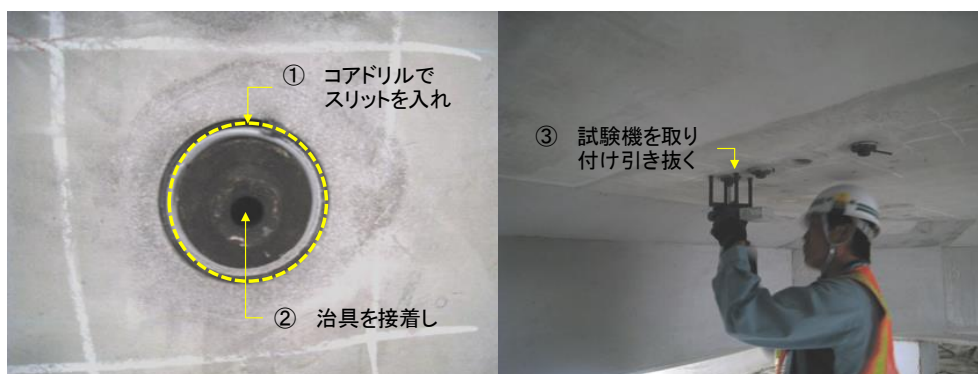


写真 5.4-2 付着強度試験

そこで、断面修復された表面にセンサを配置して、母材との界面を照準として一面配置型弾性波トモグラフィ手法を適用した。一面配置型弾性波トモグラフィ手法で算出される表面波位相速度は、付着強度を直接的に推定できるものではないが、空洞化など重大な施工不良の有無を広域的に確認することは可能である。

図 5.4-4 はトモグラフィ計測で得られた表面波位相速度分布である。表面波位相速度はほぼ均一であり極端な低下は見られないことから、当該画像から欠陥を示唆する箇所は確認されていない。

次に付着強度試験を実施する箇所を、一面配置型弾性波トモグラフィ手法で得られた表面波位相速度画像を用いて選定した。画像は各要素に割り当てられた表面波位相速度を基に描画されるものであり、付着強度試験を実施する箇所は、各要素の表面波位相速度の中で最も低い箇所（図 5.4-4 破線部）を選定した。これは、欠陥を示唆するほどの低下率では無いが、周囲と比較して何らかの理由で低下している可能性を考慮したものである。付着強度試験の結果は 1.27 N/mm^2 であり、断面修復に用いた吹付けコンクリートの最低限必要とされる付着強度 (1.0 N/mm^2)¹⁷⁾ を超えており、当該結果に見られる表面波位相速度の低下は、付着強度の許容範囲内であったと判断される。

このように任意の点ではなく一面配置型弾性波トモグラフィ手法で得られた画像を根拠として現物確認を行うことで、破壊を最小限に留め、かつより信頼度の高い確認を行うことができる。ただし、今回の検証では、付着強度試験の実施箇所を絞り込むために、速度の最も低い箇所を選定し、付着強度試験を実施したが、相対的な比較を行うためにも、速度の高い箇所において付着強度試験を実施し、速度と強度の関係を確認することが今後の課題である。

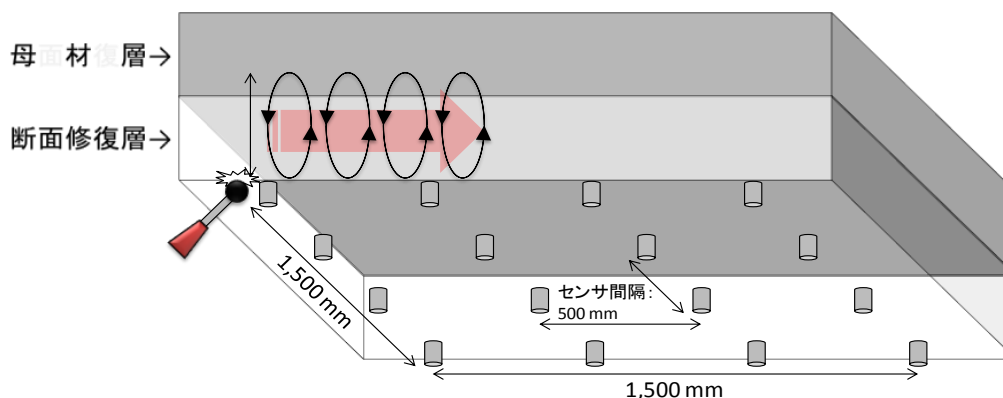


図 5.4-3 断面修復工法の施工品質確認イメージ

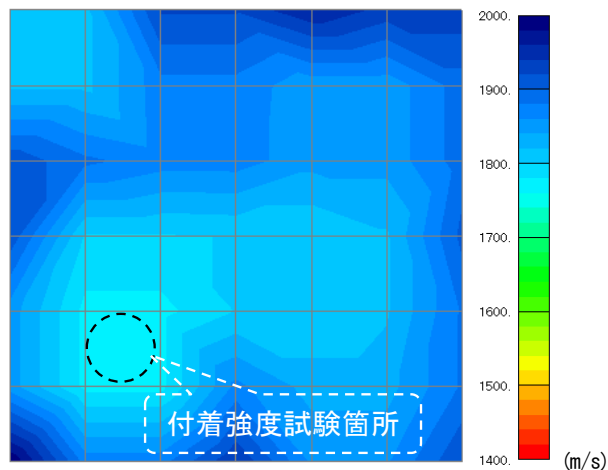


図 5.4-4 トモグラフィ結果

5.5 まとめ

本章では、「適用範囲の拡大」の課題を検討した。トンネル覆工コンクリートや擁壁のように従来適用が困難であった片側表面にしかセンサが配置できないコンクリート構造物にも適用可能なように、深さ方向の情報を有する表面波に着目し、表面波の位相速度を評価指標とした一面配置型弾性波トモグラフィ手法を提案した。また実構造物への適用結果から本手法の有効性を実証した。本章における結論を以下に示す。

- (1) 表面付近を楕円状に振動しながら伝播する表面波(レイリー波)をトモグラフィ解析に適用することで、その振動範囲内にひび割れや空洞などの欠陥部が存在する場合、それによる反射または散乱により生じる乱れを利用し、構造物内部の状態を評価できることを示した。
- (2) 一面配置型弾性波トモグラフィ手法は、片側表面へセンサを配置し、各種鋼球型のハンマにより各センサの近傍に打撃を加えることで弾性波を励起させ、走査線間で計測された表面波位相速度（表面波の抽出波形から得られる卓越周波数より算出）を基に解析を行う。鋼球径を変えることで振動範囲（測定範囲）を調整することが可能であり、片側表面にアプローチが制限される構造物においても広域的に内部の健全性を評価できることを示した。
- (3) 模擬欠陥試験体において、表面波の位相速度を用いた本手法によって片側背面だけのセンサ配置で構造物内部の健全性評価が可能であることが示唆された。同時に、欠陥の検出可能深度は励起される表面波の波長に依存すること、確実に欠陥を検出するためには、欠陥の深度と同程度以上の波長を有する表面波を励起させる必要があることが明らかとなった。
- (4) 本手法を用いることで、従来の弾性波トモグラフィ手法では不可能であったトンネル覆工コンクリートや橋梁床版、擁壁のように背面側へのアプローチが不可能な構造物に対しても、健全性評価を可能とした。
- (5) 本手法が、広域的にスクリーニング調査を行い、多重反射法やその他の詳細検査手法を要する箇所を絞り込むのに有効であることを示した。
- (6) 断面修復工法や充填補修工などリニューアル工事における施工品質の確認に適用し、トモグラフィ解析で得られる表面波位相速度画像を活用することで、破壊をとまなう検査を最小限に留め、かつ信頼度の

高い品質確認を行うことができることを示した。

一面配置型弾性波トモグラフィ手法も、実証によりデータを蓄積し、評価範囲となる波長推定の高精度化や、速度・減衰率と同様に表面波位相速度の物理的指標への関連付けによって、定量的かつ適用性の高い健全性評価が可能になると考えられる。なお、次章では本手法のさらなる効率化（省力化，低コスト化）に関する研究について論じる。

第5章の参考文献

- 1) 林宏一，鈴木晴彦，斉藤秀樹：人工振源を用いた表面波探査の開発とその土木地質調査への適用，応用地質技術年報，No. 21，pp. 9-39，2001.
- 2) 桃木昌平，塩谷智基，小林義和，水谷麻紀子：打音検査を利用する弾性波トモグラフィ計測技術の開発，コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集，第14巻，pp. 331-336，2014.
- 3) Chai, H. K., D. G. Aggelis, S. Momoki, Y. Kobayashi and T. Shiotani: Single-side access tomography for evaluating interior defect of concrete, Elsevier Science, Construction and Building Materials, 24, pp. 2411-2418, 2010.
- 4) 日本非破壊検査協会：アコースティック・エミッション試験 I，pp. 8-9，2006.
- 5) 呉佳暉，堤知明：コンクリートひび割れ深さの NDT 検証方法，弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書および第2回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集，pp. 231-238，2008.
- 6) Sassa, K., Ashida, Y., Kozawa, T. and Yamada, M.: Improvement in the Accuracy of Seismic Tomography by use of an Effective Ray-Tracing Algorithm, MIJ/IMM Joint Symposium Volume Papers, pp. 129-136, 1989.
- 7) Choon B. P., J. Ivanov, R. D. Miller, J. Xia and N. Ryden: Multichannel analysis of surface waves (MASW) for pavement: Feasibility test, Proceedings of the 5th SEGJ International Symposium, pp. 25-30, 2001.
- 8) Robert. J. G., T. Hara and N. Takeuchi: Waveform inversion for global scale 3-D Earth structure, Proceedings of the 5th SEGJ International Symposium, pp. 85-88, 2001.
- 9) Koichi H. and H. Suzuki: Surface wave propagation in two-dimensional models and its application to near-surface S-wave velocity delineation, Proceedings of the 5th SEGJ International Symposium, pp. 385-392, 2001.
- 10) M. P. Barmin, M. H. Ritzwoller and A. L. Levshin: A Fast and Reliable Method for Surface Wave Tomography, Pure and Applied Geophysics, Vol. 158, pp. 1351-1375, 2001.
- 11) Kwang Hyun Cho: Discovery of a surface wave velocity anomaly in the West Sea of South Korea, Exploration Geophysics, Vol. 45, pp. 86-93, 2014.
- 12) Mary J. Sansalone and Wiliam B. Streett: IMPACT-ECHO, BULLBRIER PRESS, pp. 67-74, 1997.
- 13) 岩野聡史，極壇邦夫，埴忠夫：多種鋼球打撃によるコンクリート板の共振振動数の確定，第52回土木学会年次学術講演会講演概要集，第5部，pp. 704-705，1997.
- 14) 岩野聡史，極壇邦夫，境友昭，森濱和正：衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の厚さ測定，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23，No. 1，pp. 547-552，2001.

- 15) Mary J. Sansalone and William B. Streett: IMPACT-ECHO, BULLBRIER PRESS, pp. 83-98, 1997.
- 16) 藤原申次, 上田洋, 佐々木孝彦: 吹付け工法により施工したポリマーセメント系断面修復材の付着・充填性状評価, 土木学会第 58 回年次学術講演会概要集, pp. 247-248, 2003.
- 17) 土木学会コンクリート委員会: 吹付けコンクリート指針 (案) [補修・補強編], コンクリートライブラリー, 第 123 号, pp. 16-24, 2005.

第6章 打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法に関する研究

6.1 はじめに

一面配置型弾性波トモグラフィ手法の提案（第5章）により，背面側へのアプローチが不可能な構造物など，幅広いコンクリート構造物への弾性波トモグラフィ手法の適用が可能となった．しかしながら，この手法においては，対象領域における走査線の数と密度が検出精度（解像度）に大きく影響し，詳細に点検しようとすればするほど，情報量を増やすために発信点を多数設定しなければならない．そのため，発信点情報を取得するためのセンサの設置数も必然的に増加し，センサの設置に多大な労力や時間を要することとなり，本手法の実構造物への適用に関して効率性に課題を残していた．

本章では，第2章で述べた弾性波トモグラフィ手法における「④計測の効率化」の課題を解決するため，コンクリート構造物の表面劣化の点検によく用いられるたたきによる方法（打音検査）のような任意・多数の打撃を発信信号とするとともに，発信点情報は受信データから推定する手法を提案する．本手法を実装した打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法により，多数のセンサ設置を必要とせず，多数の打撃信号を最小限のセンサ設置数で取得できると同時に，打音検査を行いながら内部の健全性をより包括的に点検することが可能となる¹⁾．

6.2 弾性波トモグラフィ手法におけるセンサ設置数と走査線密度の関係

例えば矩形の対象範囲において，前章までの弾性波トモグラフィ手法を適用する場合，まずは加速度センサを対象範囲の頂点に該当する4か所に設置し，さらに対象範囲内に複数の加速度センサを設置して測定を行う．第5章で提案した一面配置型弾性波トモグラフィ手法のように，16個の加速度センサを4行4列に配置した場合（図6.2-1(a)），配置された各加速度センサの近傍において打撃発信を行い，近傍の加速度センサで収録された波形を発信点波形，配置された残りの15個の加速度センサで得られる受信点波形としてトモグラフィ解析を行う．

トモグラフィ解析に用いられる情報量は，走査線240本（発信点16×受信点15）それぞれにおいて測定された発信点波形より得られる位相速度となる．つまり，弾性波トモグラフィ手法は，発信点情報（発信点波形および発信点位置）を取得するために，打撃位置にもセンサの設置を必要としている．

ここで，労力や時間を削減し効率化を図るためにセンサ設置数を減らすと，トモグラフィ解析に用いられる情報量が少なくなり，対象範囲の要素分割モデルにおいて，要素速度の解析に関わる走査線の本数（走査線密度）も少なくなる．このことから，モデルの要素分割数を少なくした低解像度のスクリーニング調査結果（図6.2-1(b)）とならざるを得ず，検出精度が低くなり重要な情報を見逃す可能性もある．

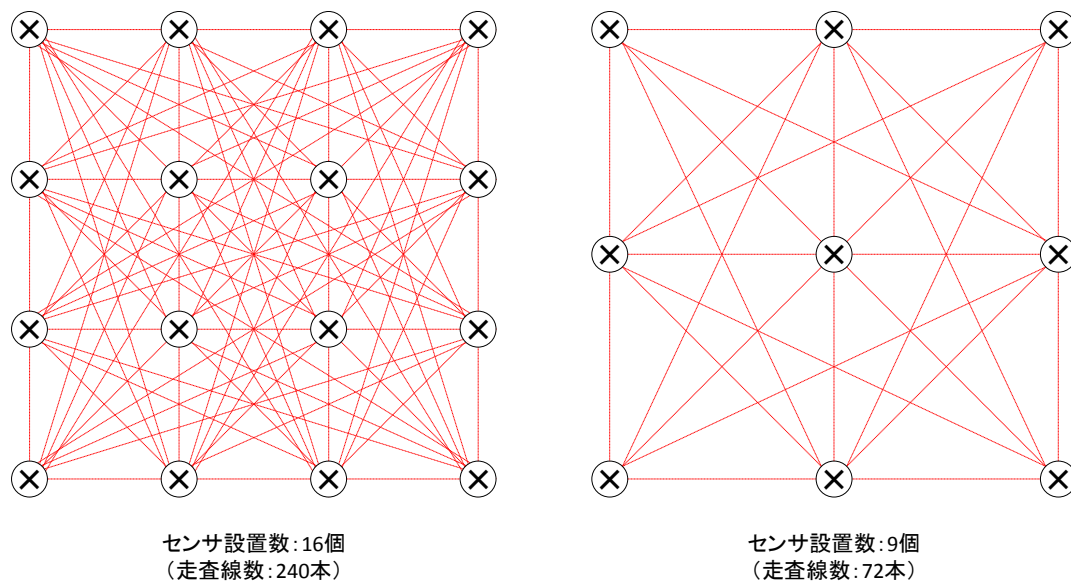
一方，走査線密度を高め，高解像度で検出精度の高いスクリーニング調査を実施するためには，加速度センサの設置数を増やさなければならず，さらに多大な労力や時間を要することになる．

図6.2-2に示すように，従来方式の弾性波トモグラフィ手法では，効率性と検出精度はトレードオフの関係となる．そこで本章では，発信点情報を受信波形から推定するアルゴリズムによる打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法を提案する．例えば，地盤工学分野においては，構造物の耐震安全性を検討するために，各地の地震計データを基に模擬地震動を推定する²⁾．また，音響測定や騒音予測などでも受信データを解析し音源をモデル化する手法が利用されている^{3), 4)}．これに倣い，弾性波トモグラフィ手法においても，発信点情報を未知として推定することにより，発信点情報を得るためのセンサが不要となる．従来方式と本章で

提案する打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法のフローを図 6.2-3 に示す。

トモグラフィ解析において必要な発信点情報は、発信点波形（発信時刻を含む時系列情報）および発信点位置である。まず受信点群情報から発信点波形の推定手法を提案する（6.3）。次に、打撃発信点位置標定手法を提案する。（6.4）

両提案手法により、既知位置での打撃発信ではなく、打音検査のように任意・多数の打撃発信による計測波形もトモグラフィ解析に利用可能となることから、発信点はセンサ設置数に関わらず、無制限に設定できる。つまり、センサ設置数を増やさなくても十分な走査線情報量を得ることができ、検出精度も確保できる。



(a) センサ設置数 16 個における走査線 (b) センサ設置数 9 個における走査線
図 6.2-1 従来方式におけるセンサ設置数と走査線密度 (× : 発信点, ○ : 受信点)

従来方式【センサ近傍打撃発信】における検出精度と効率性の構図

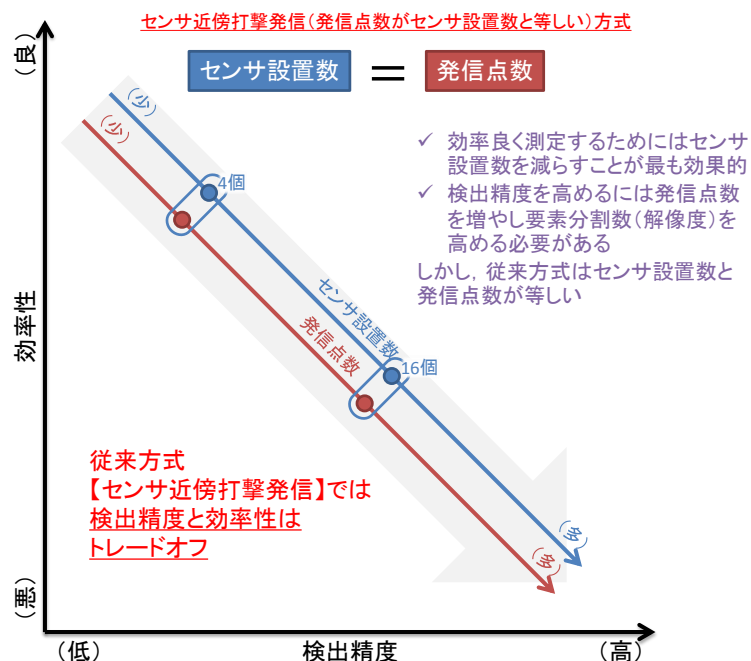
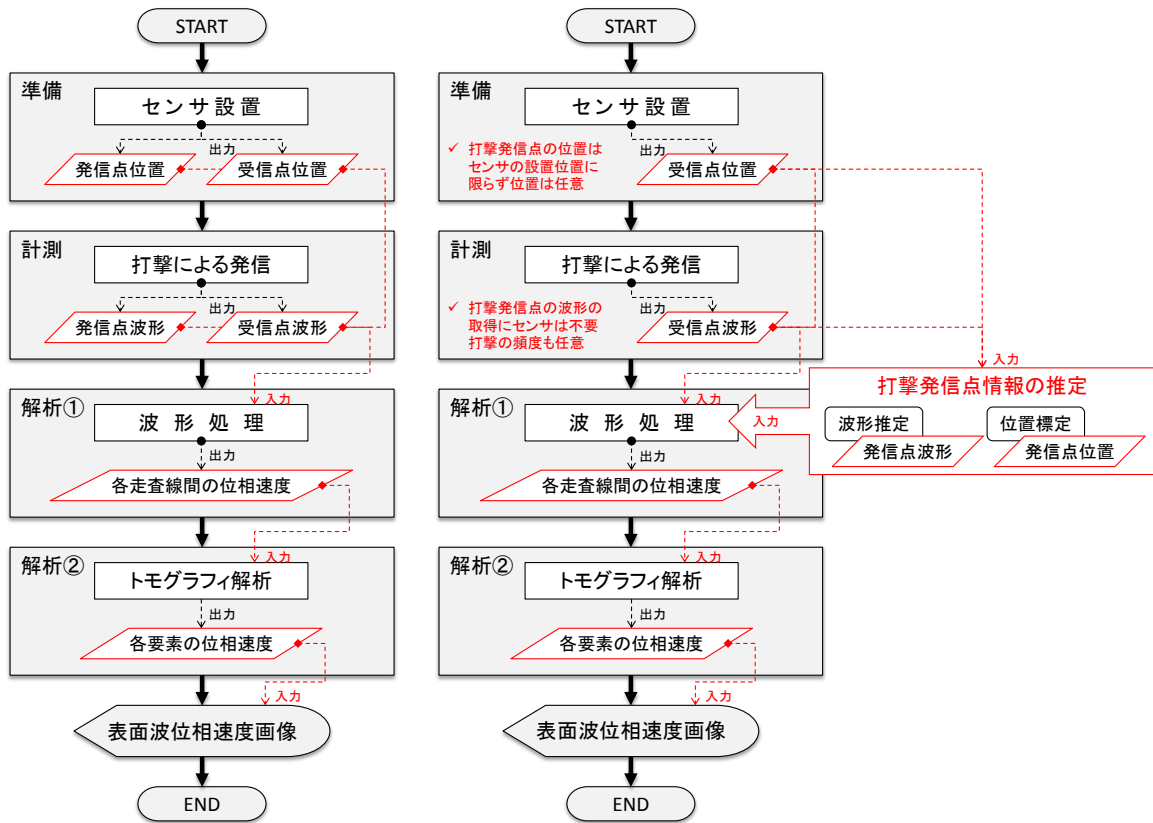


図 6.2-2 従来方式の弾性波トモグラフィ法における検出精度と効率性の関係



(a) 従来方式

(b) 打音検査方式

図 6.2-3 従来方式および打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法のフロー

6.3 打撃発信点波形推定手法の提案

一面配置型の弾性波トモグラフィ手法では、各走査線の位相速度を算出するためには、打撃による発信点の波形が必要となり、打撃発信点波形を収録するためにセンサの設置を要する。これに対し、本節では、各受信点波形から打撃発信点波形を推定する手法を提案する¹⁾。

波動が到達する時刻 t 以前で振幅がゼロとなる時刻歴波形 $x(t)$ は因果関数⁵⁾と呼ばれる。この因果関数 $x(t)$ のフーリエ変換 $F(\omega)$ は、

$$x(t) \Leftrightarrow F(\omega) = |F(\omega)|e^{i\phi(\omega)} \quad (6.3-1)$$

で定義される。 $|F(\omega)|$ はフーリエ振幅、 $\phi(\omega)$ はフーリエ位相、 ω は角振動数である。この因果関数のフーリエ振幅 $|F(\omega)|$ は、最小位相推移関数と全域通過関数に分解することができる⁶⁾。すなわち、

$$F(\omega) = |F_M(\omega)||F_A(\omega)| \quad (6.3-2)$$

である。 $|F_M(\omega)|$ は最小位相推移関数のフーリエ振幅、 $|F_A(\omega)|$ は全域通過関数のフーリエ振幅を示す。ただし、全域通過関数は、 $|F_A(\omega)| = 1$ で定義されるので、

$$F(\omega) = |F_M(\omega)| \quad (6.3-3)$$

となり、因果関数のフーリエ振幅は、最小位相推移関数のフーリエ振幅と同じとなる。さらに、最小位相推

移関数のフーリエ振幅 $|F_M(\omega)|$ とその位相 $\phi_M(\omega)$ は,

$$\phi_M(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\log|F_M(y)|}{\omega - y} dy \quad (6.3-4)$$

$$\log|F_M(y)| = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\phi_M(\omega)}{\omega - y} d\omega \quad (6.3-5)$$

で示されるヒルベルト変換⁷⁾の関係があり、互いに独立に存在しない。式(6.3-4)と式(6.3-1)により、最小位相推移関数は因果関数のフーリエ振幅より決定できる関数であり、

$$F_M(\omega) = |F_M(\omega)|e^{i\phi_M(\omega)} \quad (6.3-6)$$

と表される。それに対し、全域通過関数はフーリエ振幅特性を持たず、最小位相推移関数を除いたフーリエ位相のみで決定される関数であるから、

$$F_A(\omega) = e^{i\{\phi(\omega) - \phi_M(\omega)\}} = e^{i\phi_A(\omega)} \quad (6.3-7)$$

と表される。 $\phi_A(\omega)$ は全域通過関数のフーリエ位相である。したがって、式(6.3-1)、(6.3-6)、(6.3-7)より、因果関数のフーリエ変換 $F(\omega)$ は、最小位相推移関数と全域通過関数を用いて、

$$F(\omega) = |F_M(\omega)|e^{i\{\phi_M(\omega) + \phi_A(\omega)\}} \quad (6.3-8)$$

つまり、

$$F(\omega) = F_M(\omega)F_A(\omega) \quad (6.3-9)$$

となる。式(6.3-9)を逆フーリエ変換すると、最小位相推移関数と全域通過関数は、時間領域においても定義できる。したがって、最小位相推移関数と全域通過関数の時刻歴波形をそれぞれ $x_M(t)$ 、 $x_A(t)$ とすれば、元の因果関数 $x(t)$ は、式(6.3-10)に示すようにこれらの合積で示される。

$$x(t) = x_M(t) * x_A(t) \quad (6.3-10)$$

このように、因果関数の振幅と位相の間には相関性があり、式(6.3-3)、(6.3-4)、(6.3-5)により、ヒルベルト変換を用いることによって、因果関数のフーリエ振幅から最小位相推移関数のフーリエ位相は一意的に決めることができる。つまり、打撃発信点波形のフーリエ振幅スペクトルを推定できれば、打撃発信点波形が最小位相推移関数により得られることになる。このことを踏まえ、本章において構築した打撃発信点波形推定アルゴリズムのフローを図6.3-1に示す。以下、当フローにおける距離減衰モデル回帰分析による打撃発信点振幅の推定、および最小位相推移関数による打撃発信点波形の推定について示す。

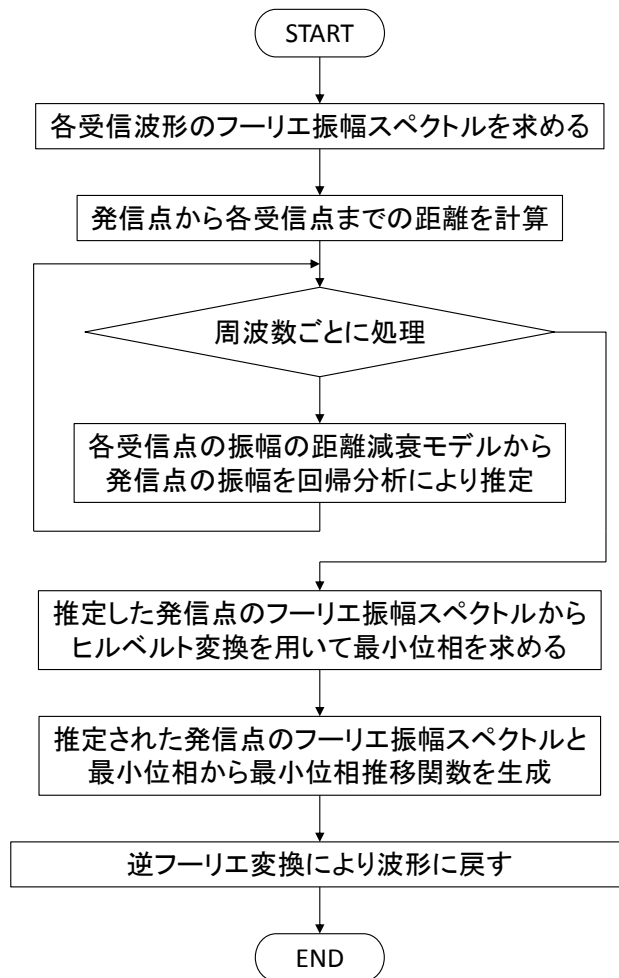


図 6.3-1 発信波形推定フロー

6.3.1 距離減衰モデル回帰分析による打撃発信点振幅の推定

本項では、打撃発信点波形推定手法の内、打撃発信点振幅（フーリエ振幅スペクトル）の推定について示す。まず、一つの打撃発信点の信号に対する各受信点波形のフーリエ振幅スペクトルを求める。次に、打撃発信点位置と各受信点位置との距離を用いて、周波数ごとに振幅の距離減衰モデルを作成し、回帰分析により各周波数の打撃発信点における振幅を推定する。ここで、実際のコンクリート構造物における弾性波測定試験の結果に本提案手法を適用した例を以下に示す。

図 6.3-2 に示すように 16 個のセンサを配置し、各近傍において打撃を行い、16 個得られた受信点波形のフーリエ振幅スペクトルに本提案手法を適用した。センサは圧電型加速度センサ（SAF51、富士セラミックス社製、共振周波数 45 kHz）を用いた。測定データより求められた受信点波形のフーリエ振幅スペクトルを図 6.3-3 に示す。



図 6.3-2 測定概要（16 センサ配置，各センサ近傍において打撃発信）

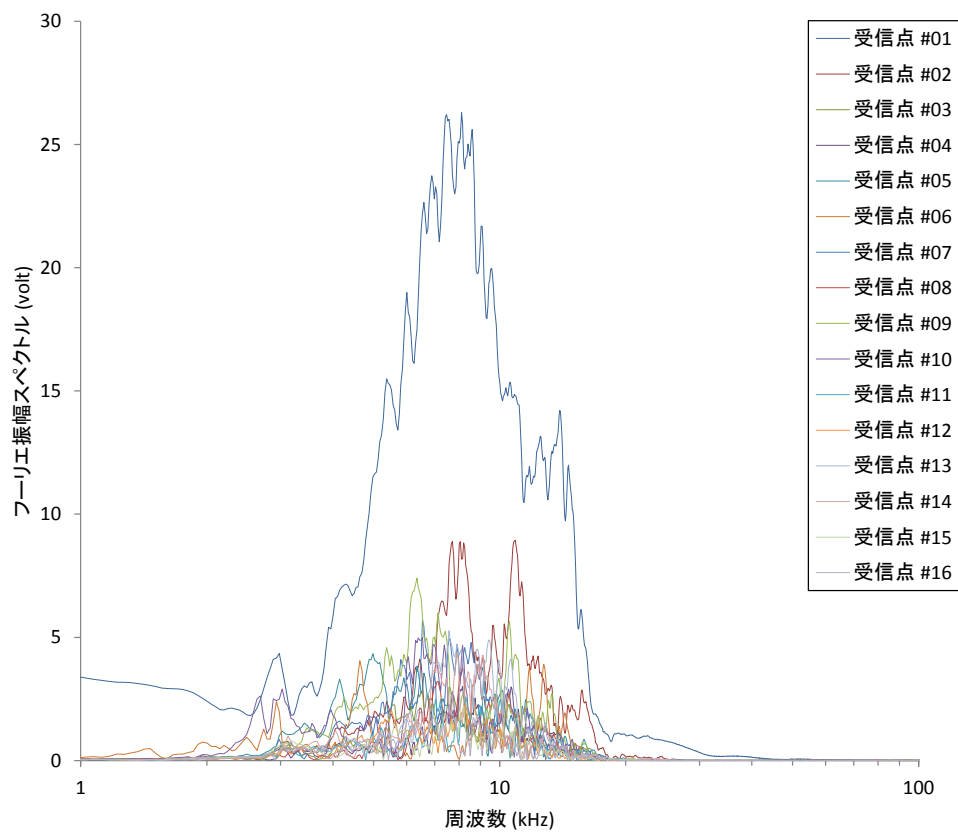


図 6.3-3 測定データより求められた受信点波形のフーリエ振幅スペクトル

本提案手法では、エネルギーの距離減衰を式(6.3-11)のように仮定した。

$$P(d) = \frac{P_0}{4\pi d^2} - \alpha d, \text{ ただし, } P(d) > 0 \text{ となる範囲に限る.} \quad (6.3-11)$$

ここで、 $P(d)$ はエネルギー密度、 P_0 は初期エネルギー、 d は発信点からの距離である。 α は係数であり、右辺第2項により距離が離れるほど加算される減衰を加えた距離減衰モデルとする。周波数ごとに各受信点における振幅の二乗を近似曲線 $y=a/x^2-bx$ にフィッティングし、係数 a 、 b を求めると、この周波数における打撃発信点波形の振幅 A_0 は式(6.3-12)により求められる。

$$A_0 = \sqrt{4\pi a} \quad (6.3-12)$$

図6.3-4に本提案手法により推定された打撃発信点波形のフーリエ振幅スペクトル、図6.3-5に本提案手法である距離減衰モデルの一例として、周波数5, 7, 9, 11, 13, 15 kHzにおける受信点フーリエ振幅の距離減衰モデルを示す。

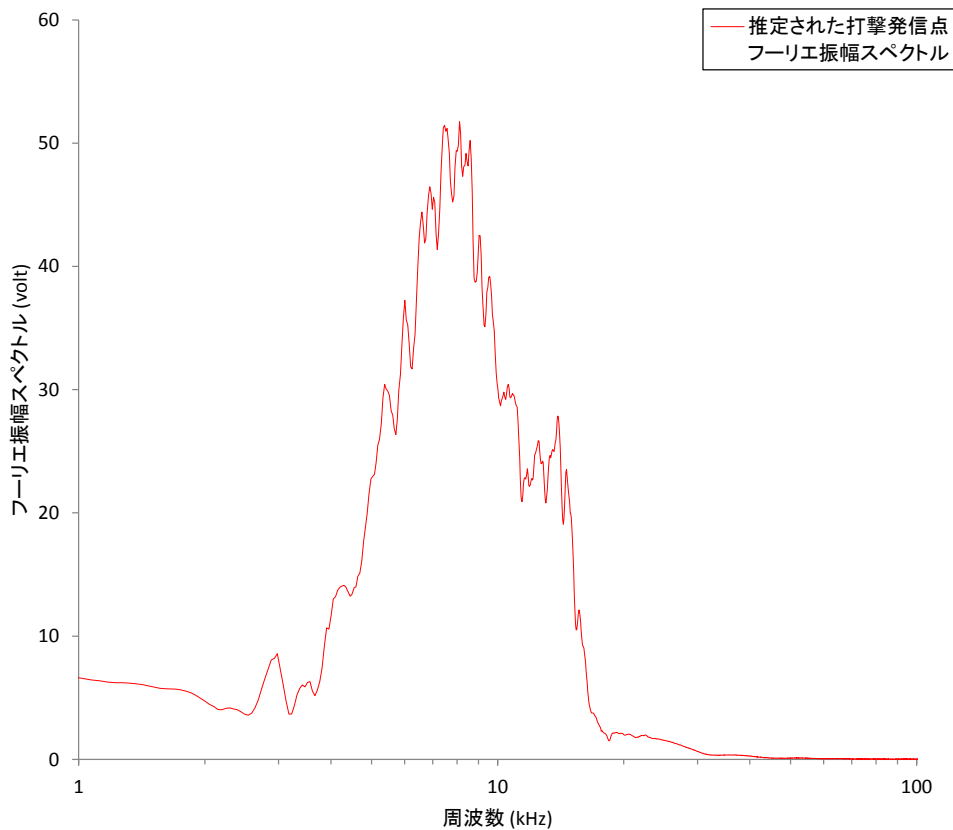
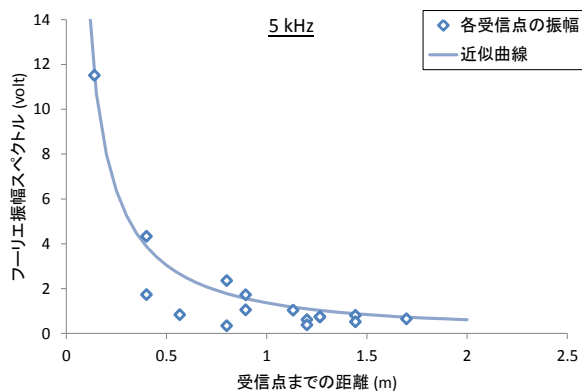
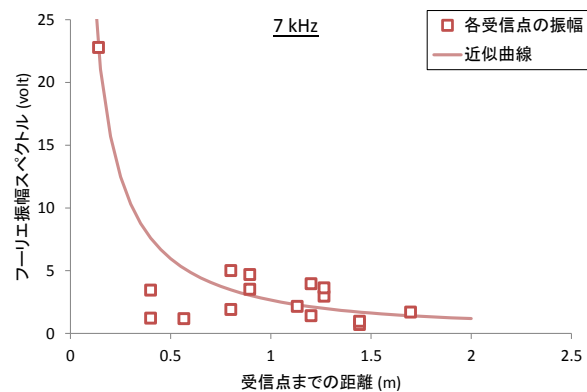


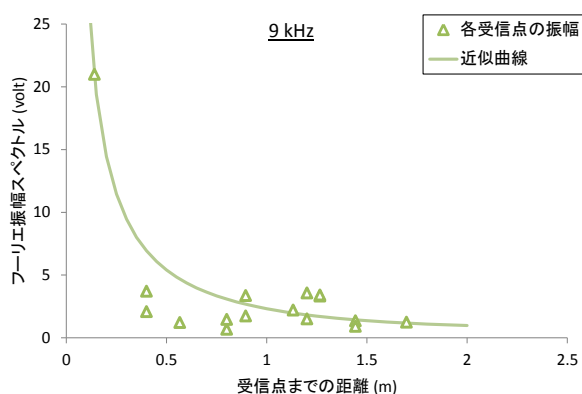
図 6.3-4 本提案手法により推定された打撃発信点のフーリエ振幅スペクトル



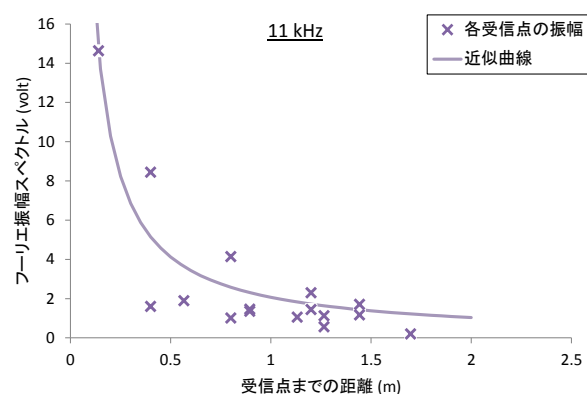
(a) 5 kHz



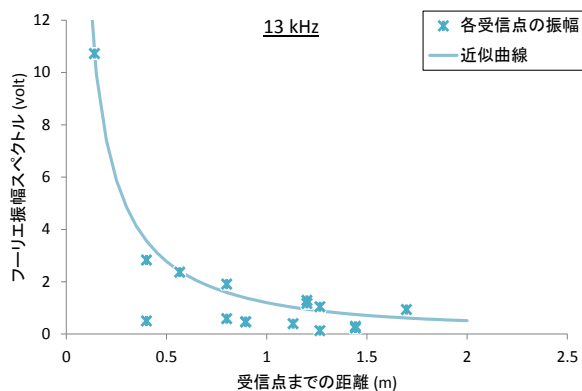
(b) 7 kHz



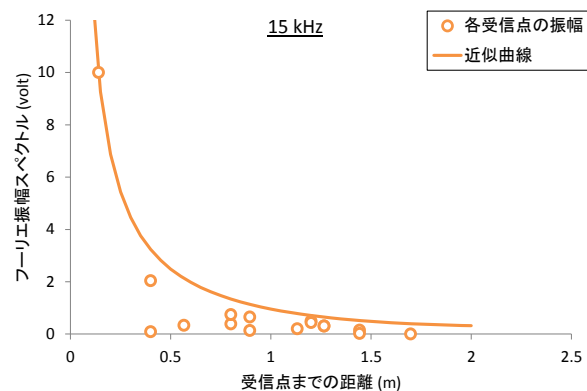
(c) 9 kHz



(d) 11 kHz



(e) 13 kHz



(f) 15 kHz

図 6.3-5 本提案手法による周波数ごとの距離減衰モデル (5, 7, 9, 11, 13, 15 kHz)

6.3.2 最小位相推移関数による打撃発信点波形の推定

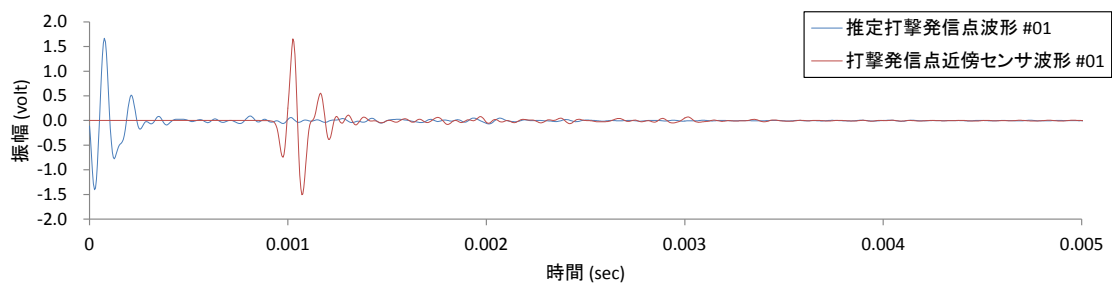
前節で示す手法により推定した打撃発信点のフーリエ振幅スペクトルに対し、ヒルベルト変換を用いて最小位相を求め、振幅と最小位相から生成した信号（最小位相推移関数）を逆フーリエ変換することで、打撃発信点波形を推定する。

図 6.3-6～図 6.3-9 に打撃発信点近傍に設置したセンサで実際に得られた波形と、本提案手法により各受

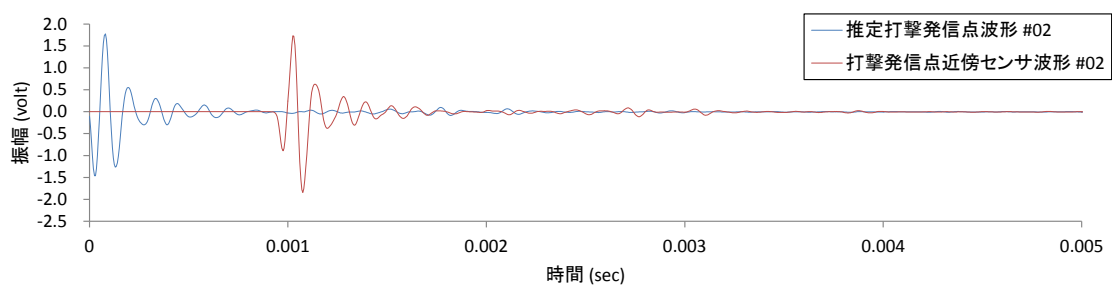
信点波形から最小位相推移関数により推定された打撃発信点波形を示す。推定された打撃発信点波形は、式(6.3-9)に示した全域通過関数が考慮されていないことから、時刻歴においてゼロから始まる波形となるが、一面配置型弾性波トモグラフィ手法で用いる、打撃点近傍に設置したセンサで実際に得られた様々な波形と、類似の位相となる波形が得られることがわかる。なお、本結果では測定領域の不均質性が影響していると考えられる波形(#06, #10)についても概ね推定できている。

以上の手法を取り入れることにより、図 6.3-10 に示すように、打撃発信点近傍にセンサを設置することなく、打撃発信点波形を推定し、一面配置型弾性波トモグラフィ手法に適用することができる。

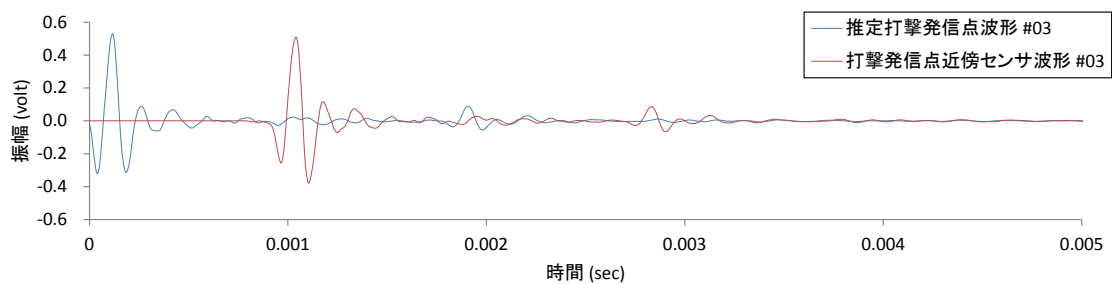
ここで、本提案手法においては打撃発信点の位置が既知である必要がある。弾性波トモグラフィ手法における検出精度を高めるためには多くの発信点数を要するが、多くの打撃発信点位置の測量を事前あるいは事後に行う必要がある。そのため、効率性という観点においては、大幅な向上にはつながらない(図 6.3-11 参照)。そこで、次節において、打撃発信点の位置を各受信点のデータから推定する手法を提案する。



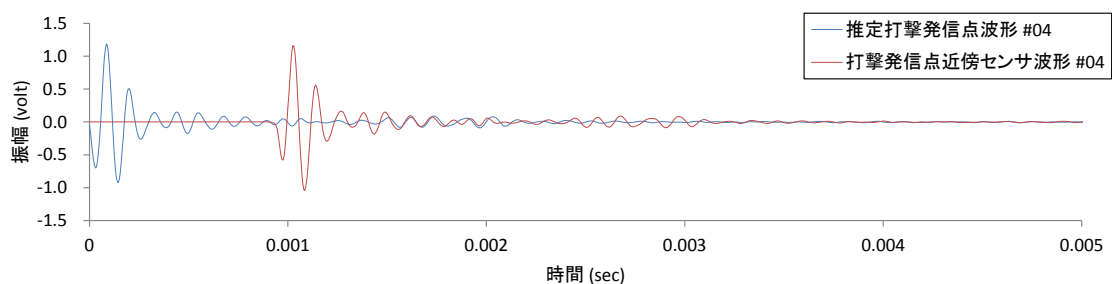
(a) 推定打撃発信点波形 #01



(b) 推定打撃発信点波形 #02

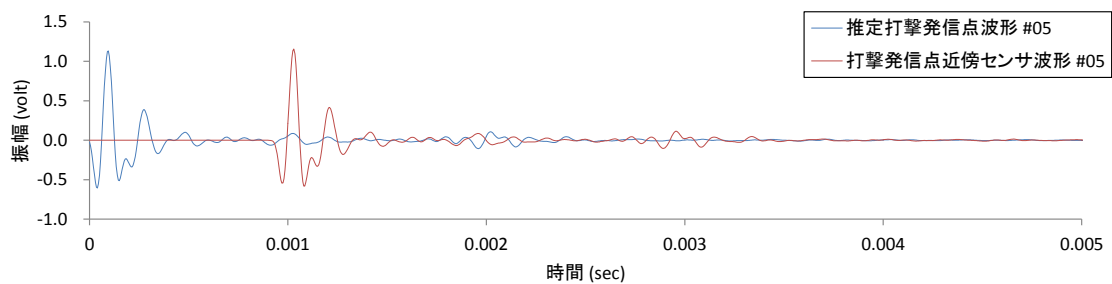


(c) 推定打撃発信点波形 #03

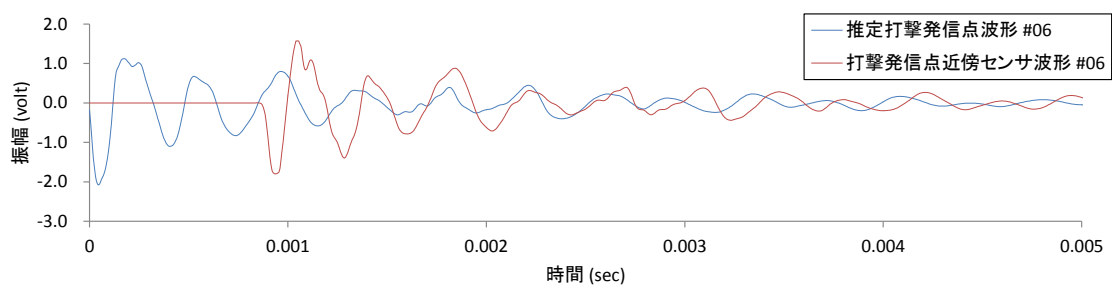


(d) 推定打撃発信点波形 #04

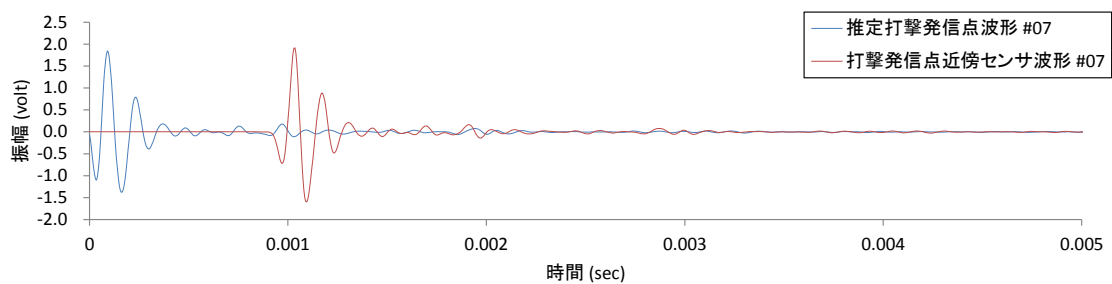
図 6.3-6 最小位相推移関数による推定打撃発信点波形と打撃発信点近傍のセンサで得られた波形 (#01—04)



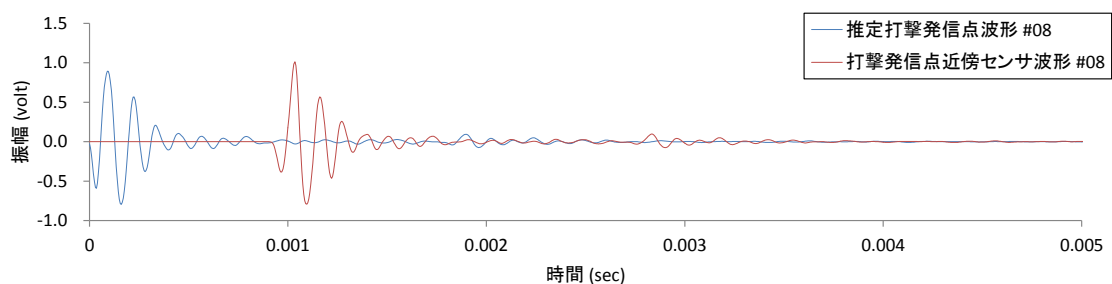
(a) 推定打撃発信点波形 #05



(b) 推定打撃発信点波形 #06

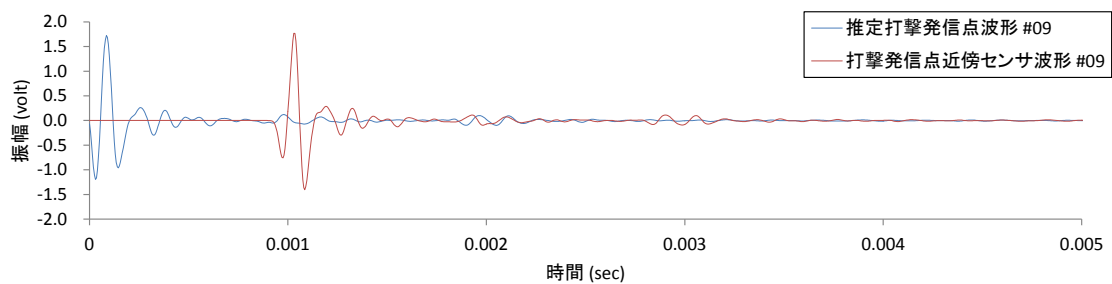


(c) 推定打撃発信点波形 #07

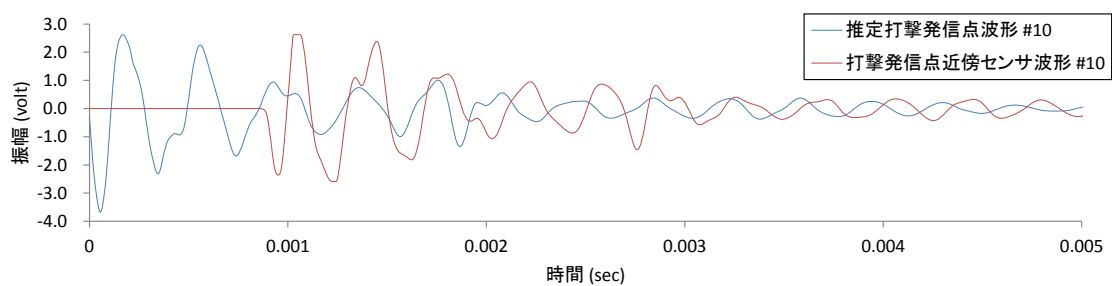


(d) 推定打撃発信点波形 #08

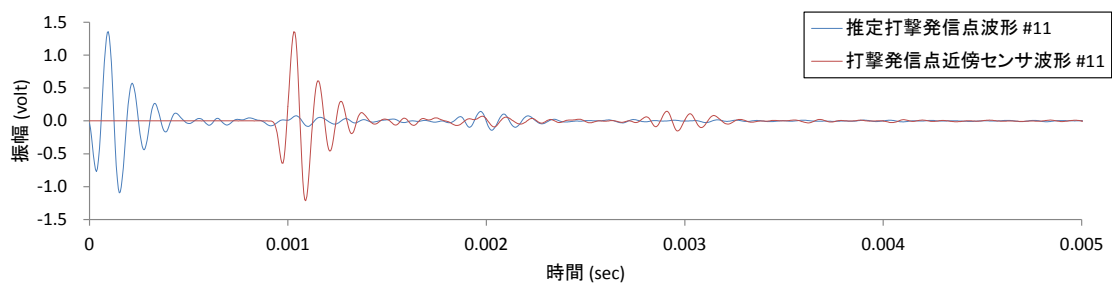
図 6.3-7 最小位相推移関数による推定打撃発信点波形と打撃発信点近傍のセンサで得られた波形 (#05—08)



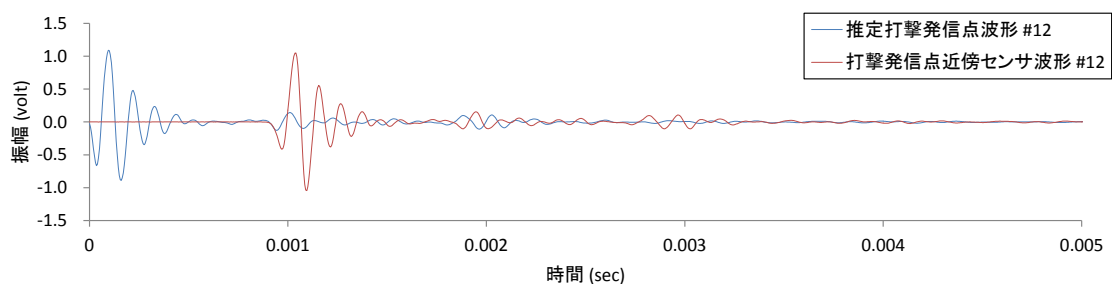
(a) 推定打撃発信点波形 #09



(b) 推定打撃発信点波形 #10

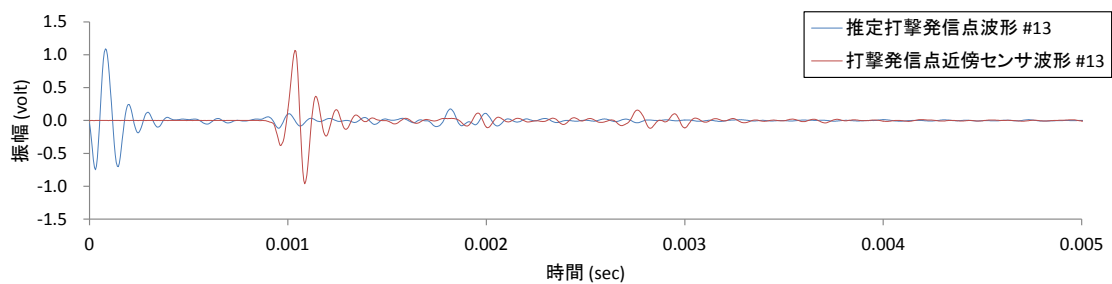


(c) 推定打撃発信点波形 #11

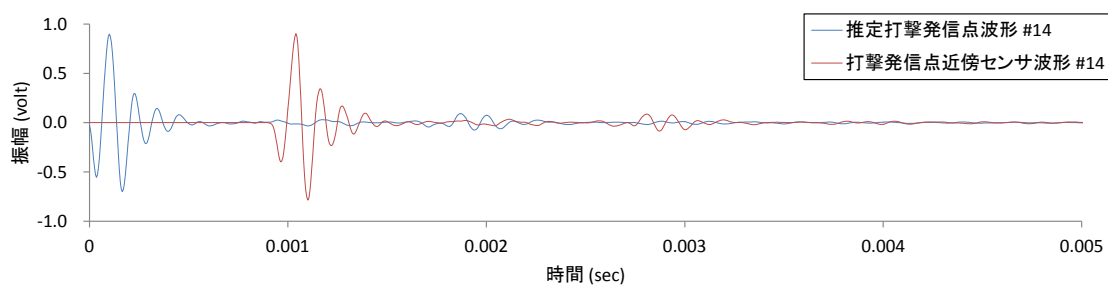


(d) 推定打撃発信点波形 #12

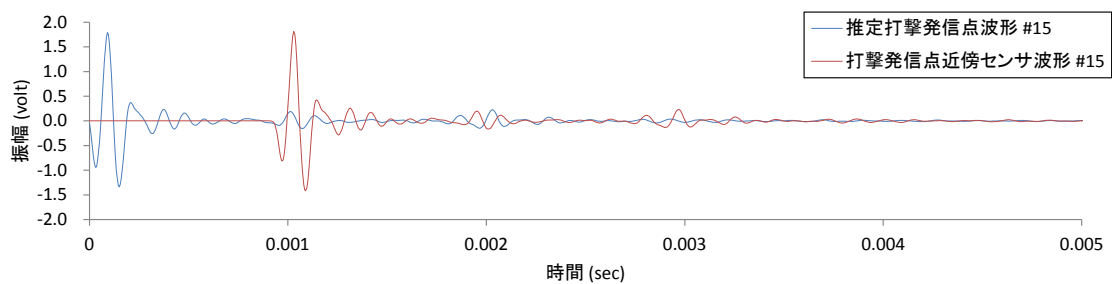
図 6.3-8 最小位相推移関数による推定打撃発信点波形と打撃発信点近傍のセンサで得られた波形 (#09-12)



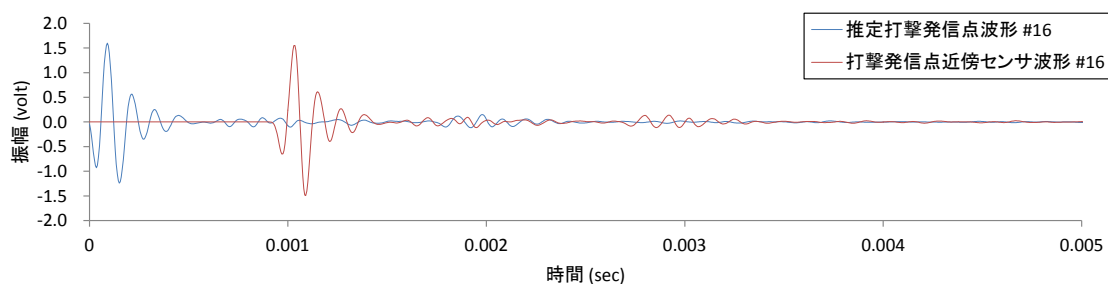
(a) 推定打撃発信点波形 #13



(b) 推定打撃発信点波形 #14



(c) 推定打撃発信点波形 #15



(d) 推定打撃発信点波形 #16

図 6.3-9 最小位相推移関数による推定打撃発信点波形と打撃発信点近傍のセンサで得られた波形 (#13-16)

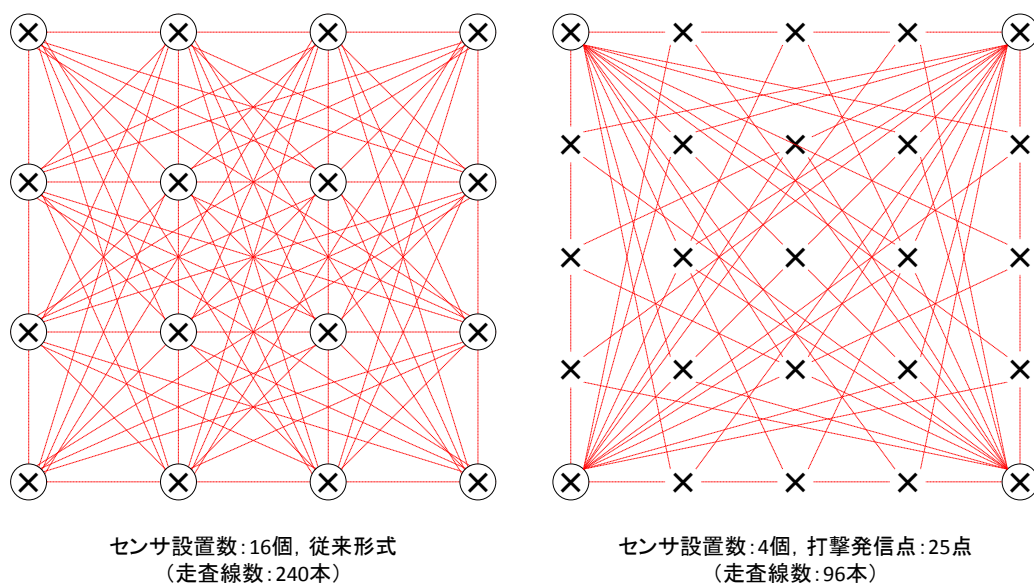


図 6.3-10 従来方式とセンサ設置不要の打撃発信方式 (× : 発信点, ○ : 受信点)

打音検査方式【任意打撃発信】における検出精度と効率性の構図

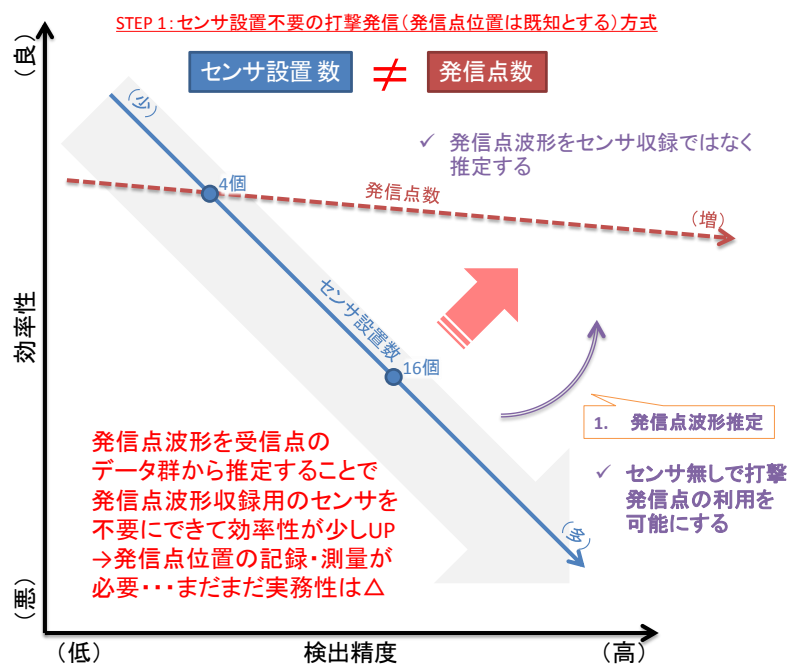


図 6.3-11 センサを不要とする弾性波トモグラフィ手法における検出精度と効率性の構図

6.4 打撃発信点位置標定手法の提案

打撃発信点の位置は、受信位置および受信波形における初動の到達時刻から逆解析により推定が可能である。これには、非破壊検査手法の1つであるアコースティック・エミッション (AE) 法の AE 源位置標定がよく用いられている⁸⁾。しかしながら、AE 法において一般的に行われる位置標定は、AE 法が元来適用されてきた金属のように均質材料を対象とするものであり、対象がセメントや砂、骨材といった複合材料で、か

つ劣化や変状が発生している老朽化したコンクリート構造物ではそのまま適用することは困難である。AE法の分野においても、AE源位置標定のコンクリート構造物への適用に関して、様々な研究がなされている^{9), 10)}ものの、均質材料を対象としたものであり、損傷の大きなコンクリート構造物には適用が難しい。

ここで、AE法について概説する。AE法とは、微小なひび割れや金属・鋼材の錆の発生、または材料間の摩擦などにもなう弾性波（AE波）を受動的に検出する技術であり、AE波の成分や発生頻度の分析、AE波の発生位置の標定などにより検査対象の評価を行う。ロケットや航空機、圧力容器やタンクの欠陥検出などに用いられ^{11), 12)}、最近では、金属・機械工学分野から土木工学分野や化学工学分野への適用も注目され、多くの研究成果が発表されている^{13), 14)}。

AE法において一般的な初動到達時刻を用いたAE源の位置標定手法について概説する。センサが3個あれば、発信点の二次元平面における位置 (x, y) を求めることができる。対象範囲におけるAE波の伝播速度を V 、それぞれのセンサ位置を (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) 、センサ間の到達時間差を Δt_{12} , Δt_{13} とすると、式(6.4-1)および式(6.4-2)が成り立つ。

$$\begin{aligned} V\Delta t_{12} \\ &= \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \\ &\quad - \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \end{aligned} \quad (6.4-1)$$

$$\begin{aligned} V\Delta t_{13} \\ &= \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \\ &\quad - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} \end{aligned} \quad (6.4-2)$$

未知数が x , y の2つであり、方程式の数も2つであるので、この方程式は解くことができる。コンピュータで非線形方程式の数値的解法などを用いて容易にAE源の二次元平面における位置を標定することが可能である。

しかしながら、従来のAE法におけるAE源位置標定手法では、前述の様に、対象範囲が均質という前提で行われる。対象範囲における伝播速度を一定として計算することがこれにあたる。したがって、この前提条件で標定されたAE波源位置が、不均質である老朽化したコンクリート構造物に対しては、真値とかい離することが想定されることから、そのまま打撃位置標定に応用することは難しい。

そこで、本研究では、対象範囲の不均質性を反映させた打撃発信点位置標定と弾性波速度分布の同時推定手法を提案する^{1), 15)-17)}。

6.4.1 打撃発信点位置標定と弾性波速度分布同時推定手法

(1) 非制限波線追跡法を用いた打撃発信点位置標定

図6.4-1に本提案手法における非制限波線追跡法を用いた打撃発信点位置および発信時刻の推定手法に用いるモデルを例示する。図中の○は受信点（センサ）を示し、弾性波トモグラフィ手法における解析モデルを破線で示す。

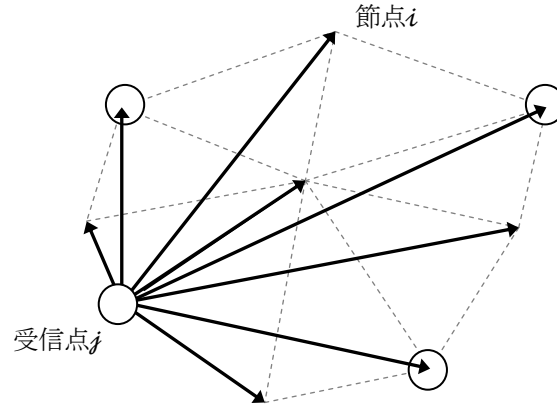


図 6. 4-1 非制限波線追跡法による打撃発信点位置および発信時刻推定用モデル

図 6. 4-1 に示すように、受信点 j から他の全ての節点 i に対して波線追跡を行い、各節点への理論走時 ΔT_{ji} を算出する。 ΔT_{ji} と受信点 j において観測された到達時刻 T_j （以降、観測到達時刻）の差 ΔT_{ji} より、各節点での潜在的な発信時刻を得る。これを受信点数 N に対しそれぞれ行い、最終的に以下のような式(6. 4-3)および式(6. 4-4)により求めた推定発信時刻の分散が最小となる節点を発信点とする（ \bar{T}_i は節点 i と各受信点で得られた推定発信時刻の平均値、 σ_i は節点 i における推定発信時刻の分散である）。また、決定された発信点における発信時刻を \bar{T}_i とする。

$$\bar{T}_i = \frac{\sum_j^N (T_j - \Delta T_{ji})}{N} \quad (6. 4-3)$$

$$\sigma_i = \frac{\sum_j^N (T_j - \Delta T_{ji} - \bar{T}_i)^2}{N} \quad (6. 4-4)$$

ここで、図 6. 4-1 では発信点から受信点への波線経路を直線で表現しているが、実際には解析モデルの各要素に与えられた弾性波速度である要素速度に基づき、最も速く到達する経路を追跡する。ゆえに、解析モデルにおいて異なる要素速度が混在する（不均質な）場合、発信点から受信点までの波線経路は 2 点間を結ぶ直線ではなく、他の節点を經由する回折経路となる場合もある。

(2) 中継点設置による打撃位置標定分解能の向上

非制限波線追跡法を用いることで、従来手法とは異なり、対象領域における弾性波伝播速度分布（不均質性）を反映した発信点位置および発信時刻を得ることができる。ただし、発信点の候補を節点としているため、本提案手法による発信点位置標定精度は解析モデルに依存する。また、要素内において弾性波速度は一定としているため、要素のサイズは非制限波線追跡法の分解能ともなる（図 6. 4-2）。このため、本提案手法による発信点位置標定精度、および非制限波線追跡法の分解能を向上させるためには、対象領域をより細分化したモデルによって解析を行わなければならない。しかし、要素数の増加は後述する、要素内の走査線密度の低下を招き、解析精度も低下する恐れがある。

そこで、図 6. 4-3 に示すように要素内に中継点を設置することによって、本提案手法による発信点位置標

定精度，および波線追跡法の分解能を任意に制御できるようにした．中継点は，有限要素法で一般的に使われている内挿関数によって，要素形状のひずみが大きくなければ，比較的均一に配置される．中継点を設置することで，図 6.4-3 に示す通り波線経路をより高い分解能で追跡できる．また，この中継点も節点と同様に発信点の候補として取り扱うことにより，要素数を増やさずに発信点の推定精度を向上させることが可能となる．

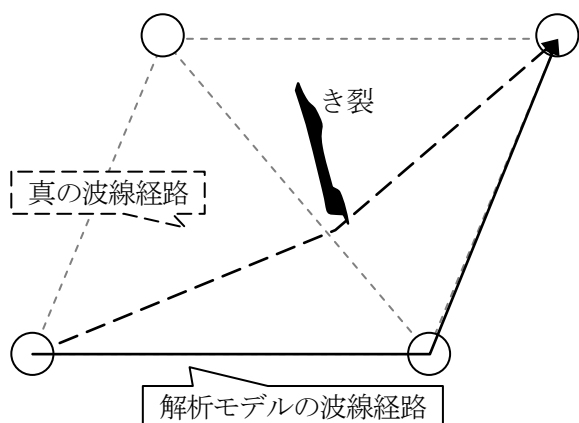


図 6.4-2 波線追跡法の分解能

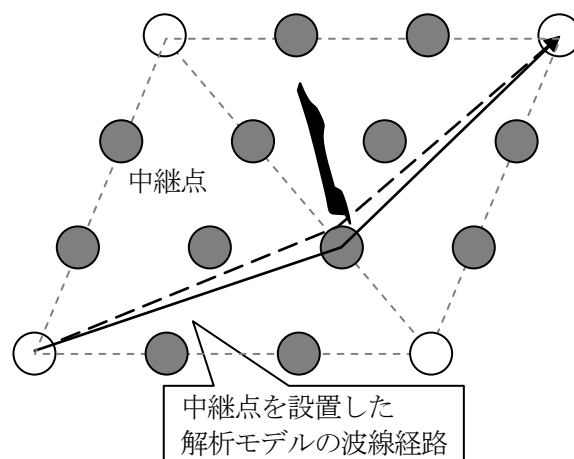


図 6.4-3 中継点の設置による解析精度の向上

(3) 暫定打撃発信位置を用いたトモグラフィ解析による弾性波速度分布の修正

解析モデルの各受信点における弾性波の到達時刻（以降，理論到達時刻）は，推定された発信点より改めて非制限波線追跡法を実施し，推定された発信時刻に発信点から各受信点までの波線経路における理論走時を加えることによって求められる．この理論到達時刻と観測到達時刻との差異で表される走時残差を解消すべく，各要素速度の更新を行うことにより，最適な弾性波速度分布へと修正される．各要素速度の更新には，同時反復再構成法（SIRT）¹⁸⁾を用いた．

この推定された発信点を用いたトモグラフィ解析により修正された弾性波速度分布において，再度 6.4.2(1)に示した本提案手法による発信点位置標定を実施し，その結果に基づいて弾性波速度分布もさらに修正する．

このように，打撃発信点の位置標定と弾性波速度分布の修正の収斂解析によって，最終的に発信点位置と弾性波速度分布を同時に推定することが可能となる．以上をまとめた本手法のフローを図 6.4-4 に示す．

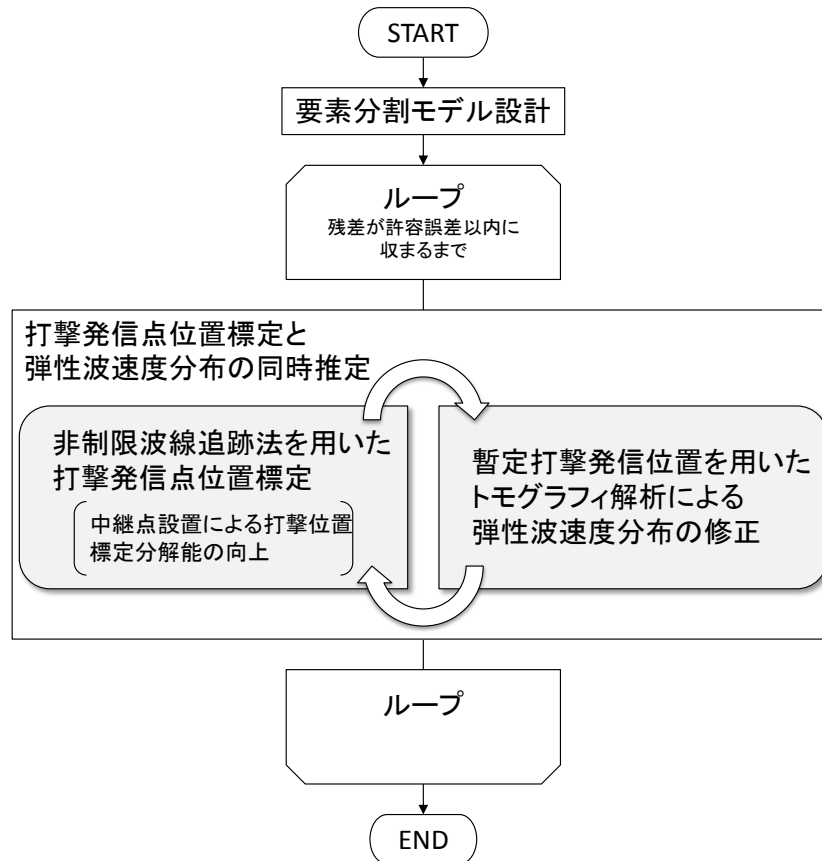


図 6.4-4 打撃発信点位置標定フロー

6.4.3 打撃発信点位置標定手法の検証

打撃発信点位置標定と弾性波速度分布の同時推定アルゴリズムは、弾性波速度分布を逐次推定しながら、つまりは対象範囲の不均質性を考慮しながら打撃発信点位置標定を行うアルゴリズムである。

本提案手法の有効性を数値シミュレーション、および、模擬損傷試験体により検証する。

(1) 数値シミュレーションによる検証

図 6.4-5 に打撃発信点位置標定手法の検証に用いた数値シミュレーションの概要を示す。図中の○印が想定した打撃発信点（49 点）である。波線経路は原則として直線経路、損傷を横切る場合のみ図中に例示するように回折経路として、受信点における初動到達時刻を算出した。なお、打撃発信点の情報が既知、49 個のセンサを配置し、センサ近傍打撃 49 発信×48 受信、計 2,352 本の走査線で得られる初動走時を用いた弾性波トモグラフィにより得られた表面伝播初動速度分布を図 6.4-6 に示す。損傷部が低速度領域として表れており、これは、本来打撃発信点位置標定において反映させるべき分布として想定した。

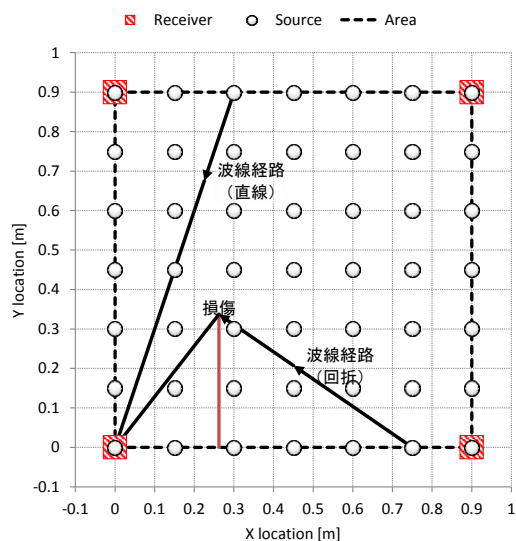


図 6.4-5 シミュレーション概要

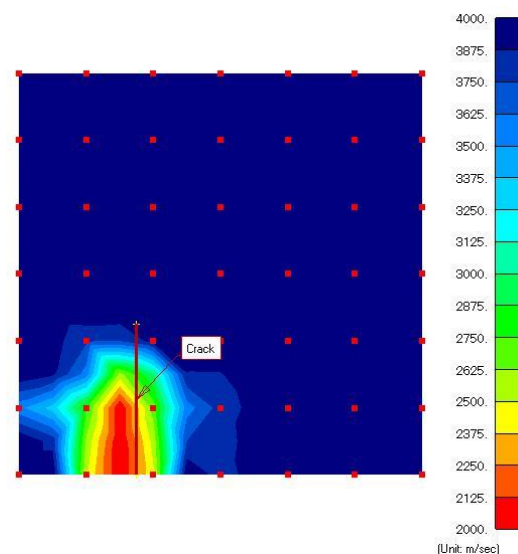


図 6.4-6 本来打撃発信点位置標定に反映させるべき表面伝播初動速度分布

図 6.4-7 に表面均質前提による打撃発信点位置標定の結果、図 6.4-8 に表面伝播初動速度分布が反映された打撃発信点位置標定の結果を示す。なお、両手法ともに受信点は領域端部の 4 点とし解析を行った。図中●印が位置標定された打撃発信点、○印が真の打撃発信点である。表面均質前提による打撃発信点位置標定結果に比べ、図 6.4-6 に示す表面伝播初動速度分布を用いて標定された打撃発信点が、真値との誤差が低減されていることがわかる。また、打撃発信点位置標定に用いられた表面伝播初動速度分布（図 6.4-9）も、概ね損傷部を反映しており、本研究で提案した打撃発信点位置標定手法が有効であることが示された。

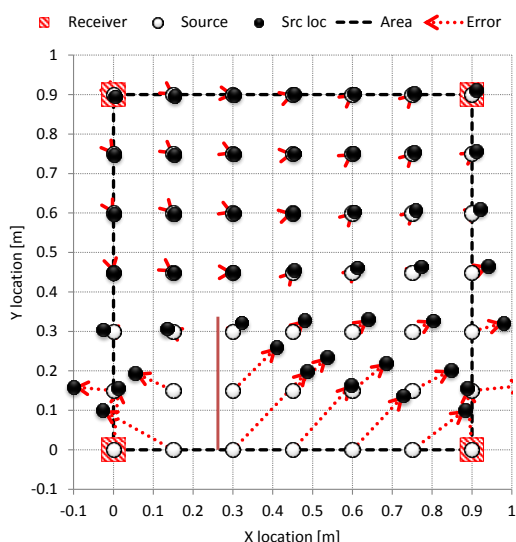


図 6.4-7 打撃発信点位置標定結果（表面均質前提）

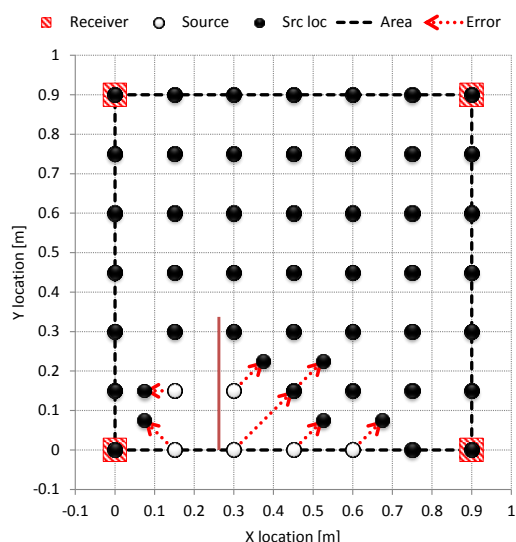


図 6.4-8 打撃発信点位置標定結果
（表面伝播初動速度分布を反映）

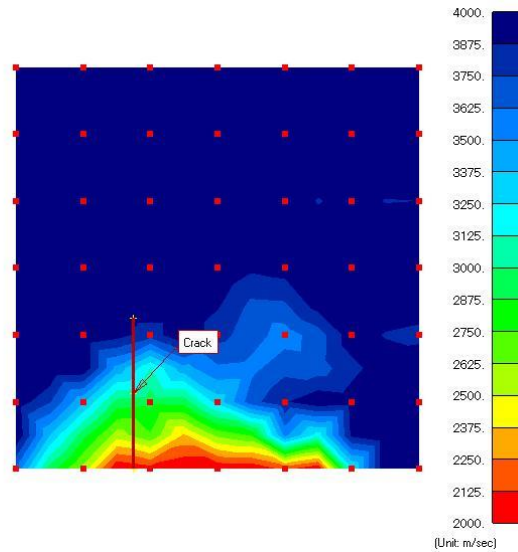


図 6.4-9 打撃発信点位置標定に用いられた表面伝播初動速度分布

(2) 模擬欠陥コンクリート試験体による検証

写真 6.4-1 および写真 6.4-2 は、本研究において打撃発信点位置標定手法の検証に用いたコンクリート試験体（1,200×1,200×300 mm）である。試験体右側下部には豆板を模した模擬欠陥部を設けている。この試験体において鋼球打撃による発信を所定の位置（49 か所）で行い、1つの発信に対し全 49 個のセンサによって受信した波形から発信点時刻および受信点時刻を計測した。センサは圧電型加速度センサ（SAF51、富士セラミックス社製、共振周波数 45 kHz）を用いた。従来の表面均質前提による打撃発信点位置標定と、表面伝播初動速度分布を同時推定する打撃発信点位置標定手法について、端部 4 点の受信点情報を用いてそれぞれ標定を行った。別途、弾性波トモグラフィ手法により、発信点・受信点情報および走査線 2401 本（49 発信×49 受信）の初動走時を用いて、当該試験体において打撃発信点位置標定に反映されるべき表面初動伝播速度分布を推定した（図 6.4-10）。



写真 6.4-1 模擬欠陥コンクリート試験体および計測状況



写真 6.4-2 模擬欠陥コンクリート試験体

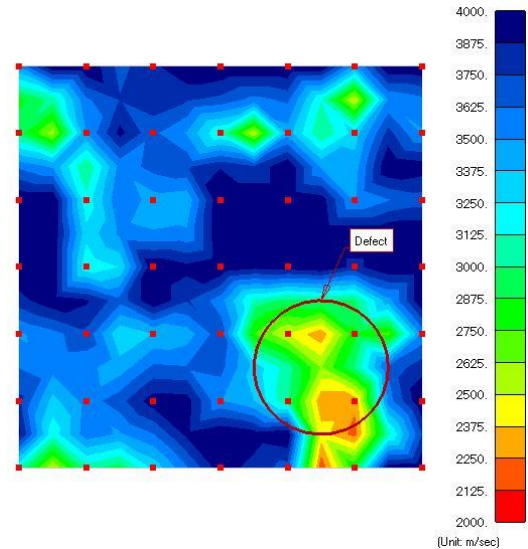


図 6.4-10 想定される表面伝播初動速度分布

図 6.4-11 に表面均質前提による打撃発信点位置標定結果（図中●印）を示す．真の打撃発信点位置（図中○印）の平面位置に対する誤差（図中矢印）は，1 点あたり平均 0.163 m，最大 1.509 m であった．誤差の原因として，別途計測により推定された表面伝播速度分布（図 6.4-10）が示すように，模擬欠陥部を含め速度分布が不均一であるにも関わらず均一の速度分布により推定することが大きな影響を与えていることが挙げられる．これに対し，図 6.4-12 に表面伝播初動速度分布が反映された打撃発信点位置標定結果を示す．真の打撃発信点の平面位置に対する誤差は，1 点あたり平均 0.096 m，最大 0.404 m の誤差に低減され（図 6.4-13），この打撃発信点位置標定に用いられた表面伝播初動速度分布（図 6.4-14）からも，模擬欠陥部を含め不均一な速度分布が反映されたことが位置標定誤差の低減につながったことがわかる．

以上のことから，本研究において提案した打撃発信点位置標定手法が，従来は困難であった損傷のあるコンクリート構造物表面に対して有効であることが示された．

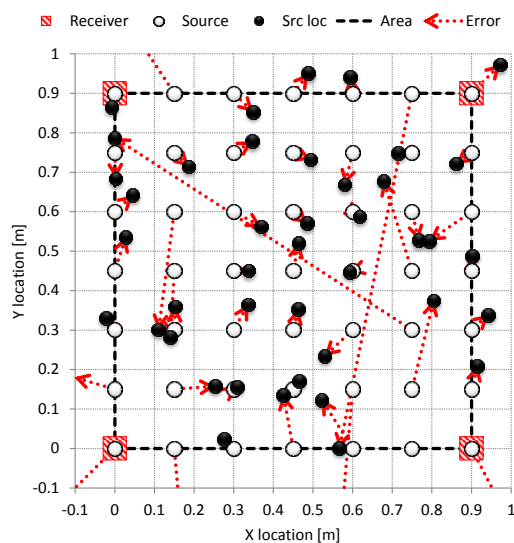


図 6.4-11 打撃発信点位置標定結果（表面均質前提）

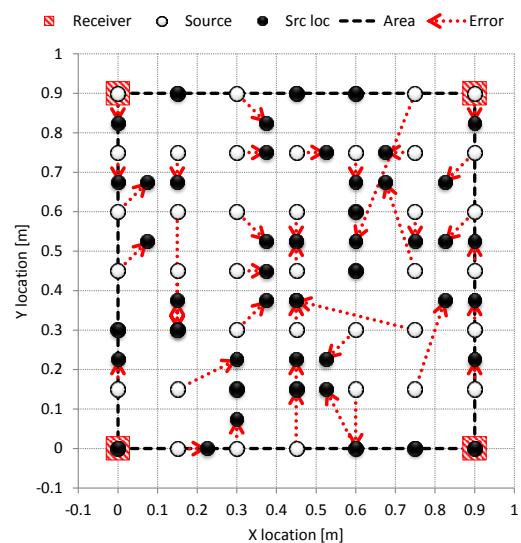


図 6.4-12 打撃発信点位置標定結果
（表面伝播初動速度分布を反映）

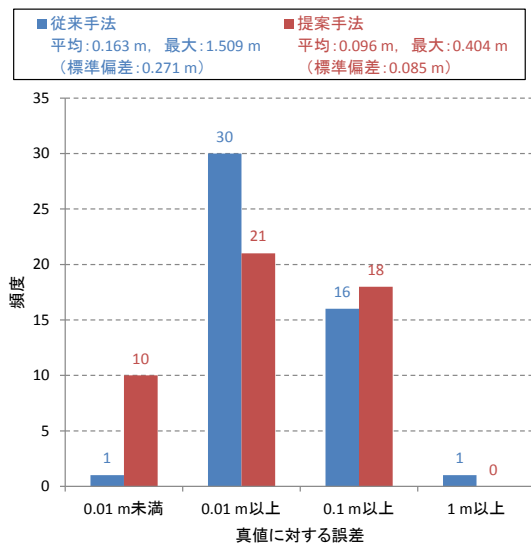


図 6.4-13 従来手法と提案手法の真値に対する誤差

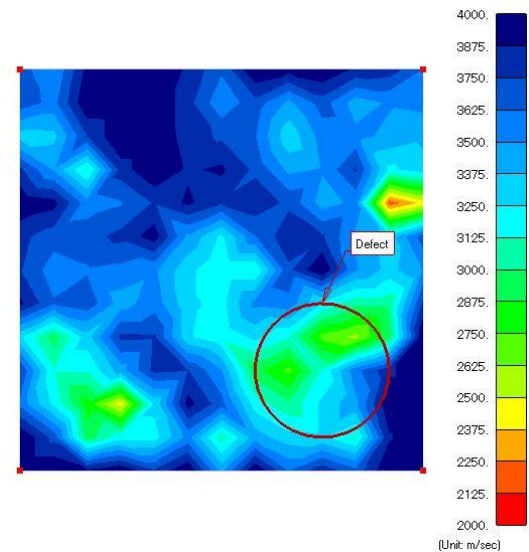


図 6.4-14 打撃発信点位置標定に用いられた表面伝播初動速度分布

6.5 打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法の現場検証

6.5.1 検証概要

本提案手法の有効性を、実構造物を用いて検証する。図 6.5-1 に検証概要を示す。対象は橋台構造物で、評価範囲は縦 1.5 m×横 2.4 m である。表面波の波長に相当する奥行方向の範囲は、発信点波形（センサ近傍打撃発信波形）の周波数応答より 0.5 m と推定された。対象範囲には対角線に沿うように鉛直ひび割れが確認できる（写真 6.5-1）。5.4 で示した表面に見えない深さにある鉛直ひび割れに対して、表面波を用いた一面配置型トモグラフィが有効であった結果を基に、本提案手法により、この鉛直ひび割れを検出することを目的とする。

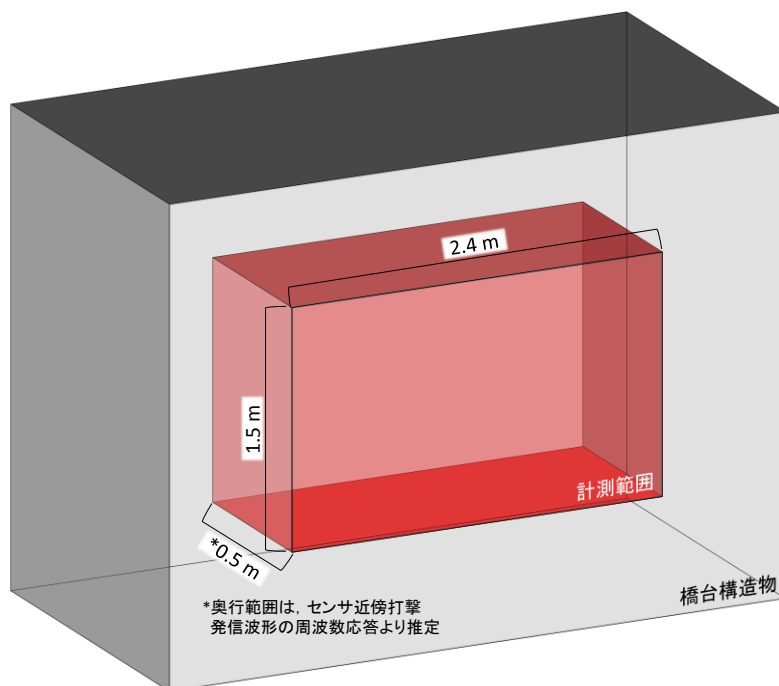


図 6.5-1 実構造物検証概要

6.5.2 計測方法

本提案手法である打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法における加速度センサの配置は、対象範囲（縦 1.5 m×横 2.4 m）の端部 4 点とし（図 6.5-3、写真 6.5-2）、鋼球型ハンマを用いて対象範囲内においてランダムに打撃を行い、これを発信とした解析を行う。また、比較検証のため、同位置に縦 0.5 m、横 0.8 m 間隔、計 16 個のセンサを配置し（図 6.5-2、写真 6.5-1）、5 章で開発した一面配置型弾性波トモグラフィ手法も実施した。なお、図中および写真中には目視で確認できた鉛直ひび割れを併せて示す。センサは圧電型加速度センサ（SAF51、富士セラミックス社製、共振周波数 45 kHz）を用いた。

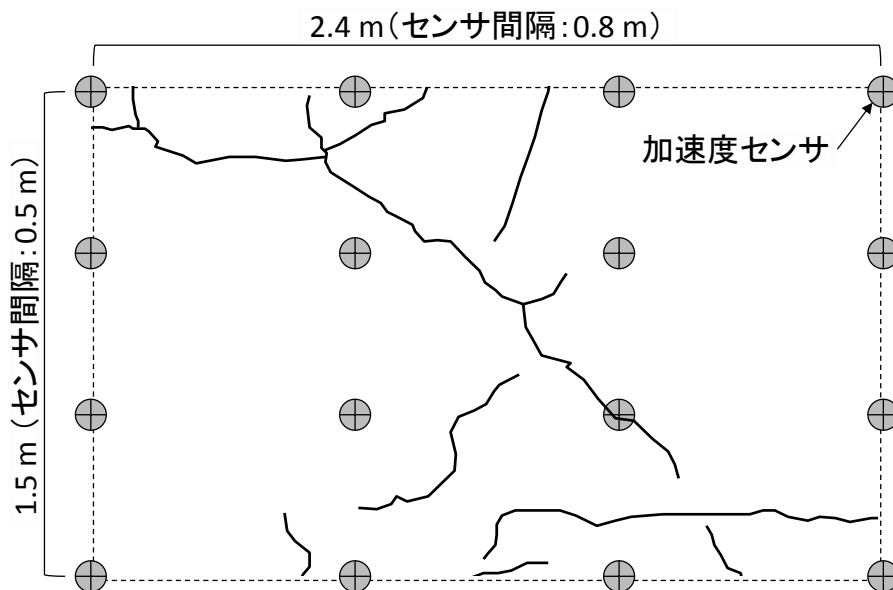


図 6.5-2 センサ配置（一面配置型弾性波トモグラフィ手法、センサ設置数 16 個）

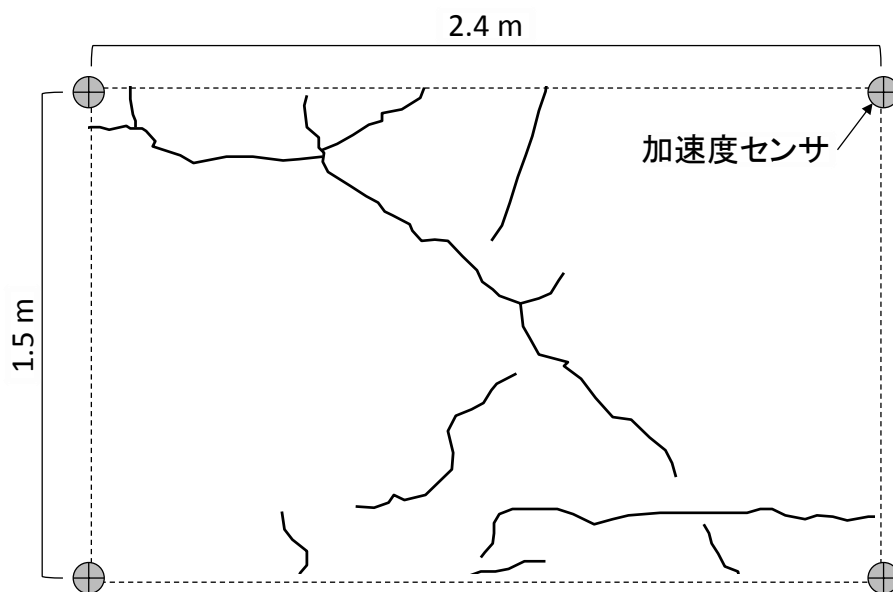


図 6.5-3 センサ配置（ランダム打撃による発信、センサ設置数 4 個）



写真 6.5-1 センサ配置
(一面配置型弾性波トモグラフィ手法, センサ設置数 16 個)



写真 6.5-2 センサ配置
(任意打撃による発信, センサ設置数 4 個)

6.5.3 検証結果と考察

図 6.5-4, および, 図 6.5-5 に, それぞれ, 一面配置型弾性波トモグラフィ手法による位相速度画像, および, 提案手法による位相速度画像を示す. 図中には目視で確認された鉛直ひび割れを併せて示す. 検証における準備と計測に要した時間は, 従来手法である一面配置型弾性波トモグラフィ手法の約 1 時間に対し, 本提案手法では 4 分の 1 にあたる 15 分程度であった. また, 図 6.5-6 に示すように検証において提案手法により推定された打撃発信点位置は 107 点で, 走査線数は 428 本 (発信点 107×受信点 4) となり, 従来技術 (240 本) の約 2 倍の情報量となっている. また, 図 6.5-7 に示すように, 情報量に基づき要素数を増やし, 従来手法よりも解像度を高めている. 両結果ともに鉛直ひび割れに沿うように低速度の領域が示されているが, 提案手法による位相速度画像 (図 6.5-5) の方が, 鉛直ひび割れの分布をより鮮明に示している.

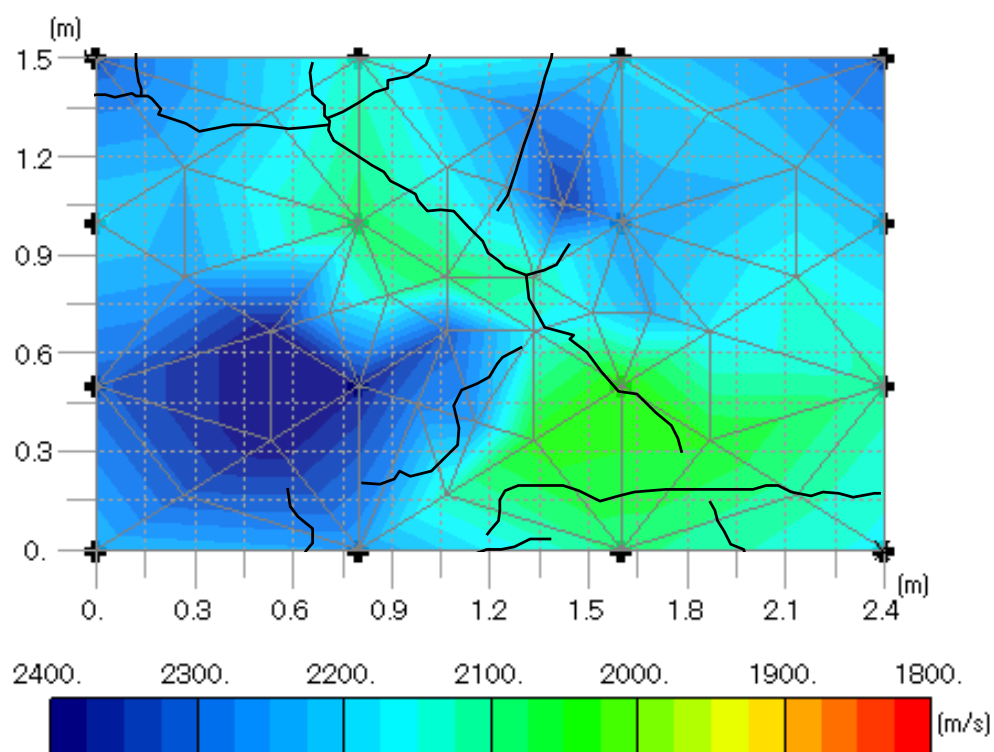


図 6.5-4 一面配置型弾性波トモグラフィ手法による表面波位相速度画像

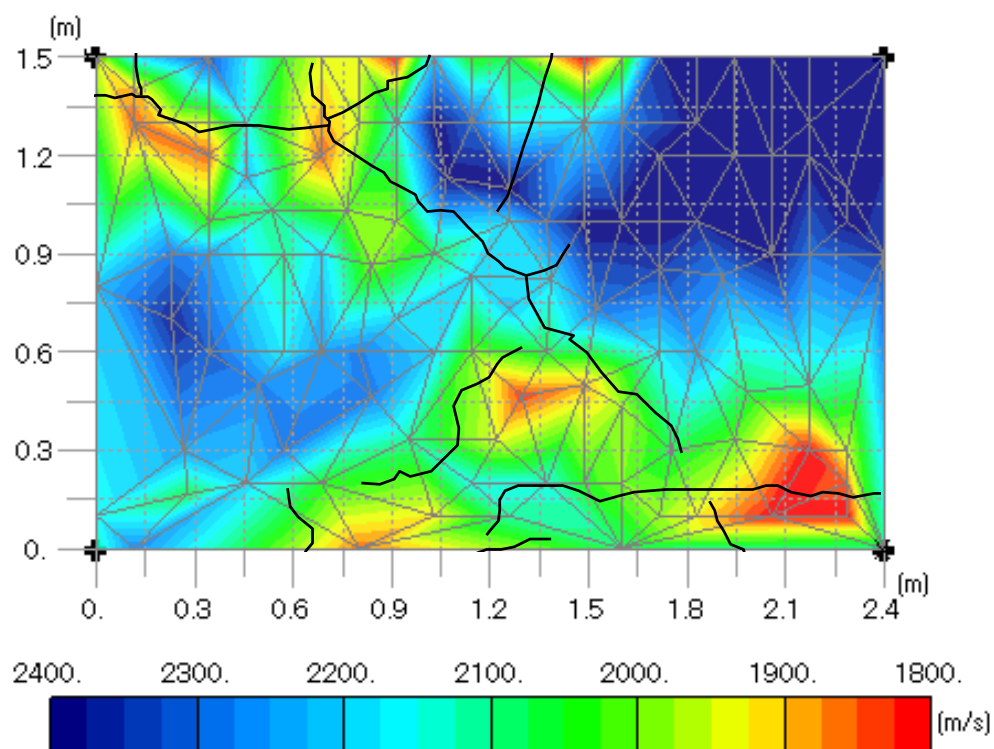


図 6.5-5 任意の打撃信号による表面波位相速度画像

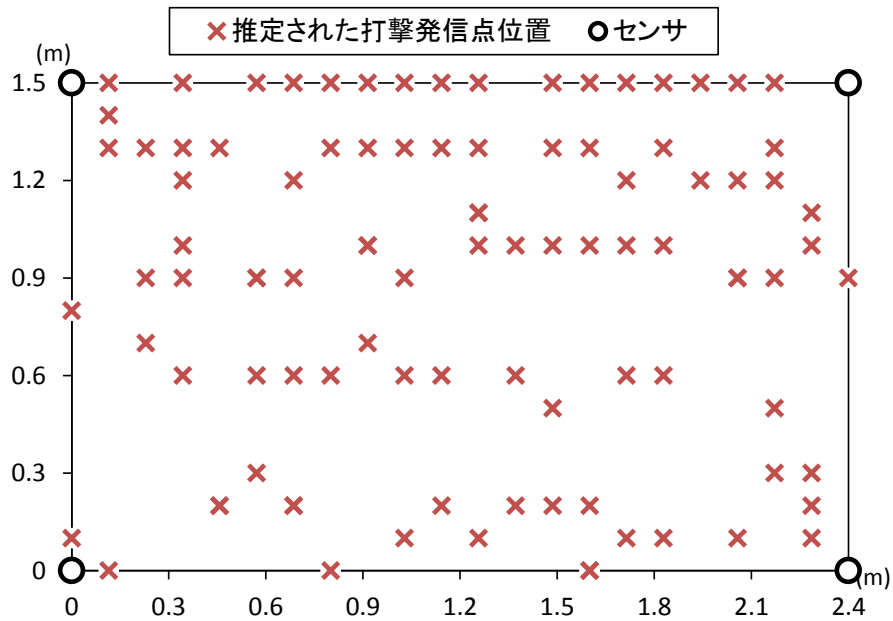
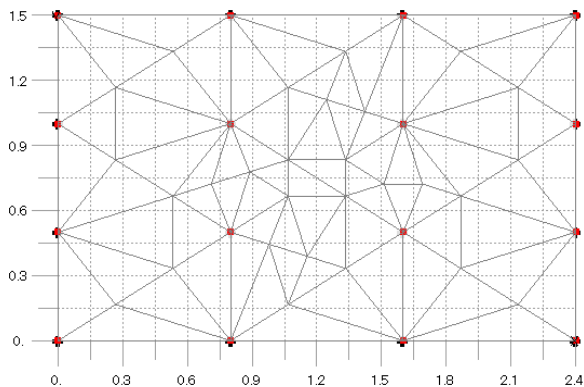
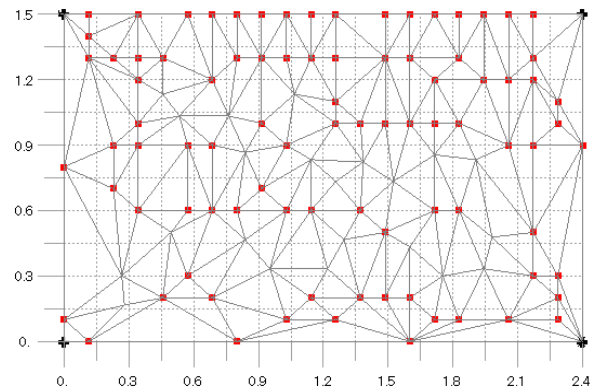


図 6.5-6 推定された打撃発信点位置



(a) 一面配置型弾性波トモグラフィ手法
(要素数 74 個)



(b) 本提案手法 (要素数 202 個)

図 6.5-7 情報量に基づく要素数の増加

以上のことより、本提案手法は、検出精度は一面配置型トモグラフィ手法と同等以上でありながら、センサを設置する手間や計測に掛かる時間や労力を約 1/4 に削減でき、大幅な効率性の向上が示された。

図 6.5-8 に、打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法における検出精度と効率性の構図を示す。既知の打撃発信点情報を用いる従来の計測手法と比べ、打撃発信点の位置および発信点波形を推定するため、仮に同程度の発信点数であれば従来手法よりも、発信点位置および発信点波形の推定誤差分精度は低下することになる。しかし、本提案手法では、打音検査のような多数かつ任意の打撃信号の利用により、効率をほとんど低下させることなく従来よりも大幅に多い情報量を得ることで、検出精度（解像度）が同等以上となっている。

打音検査方式【任意打撃発信】における検出精度と効率性の構図

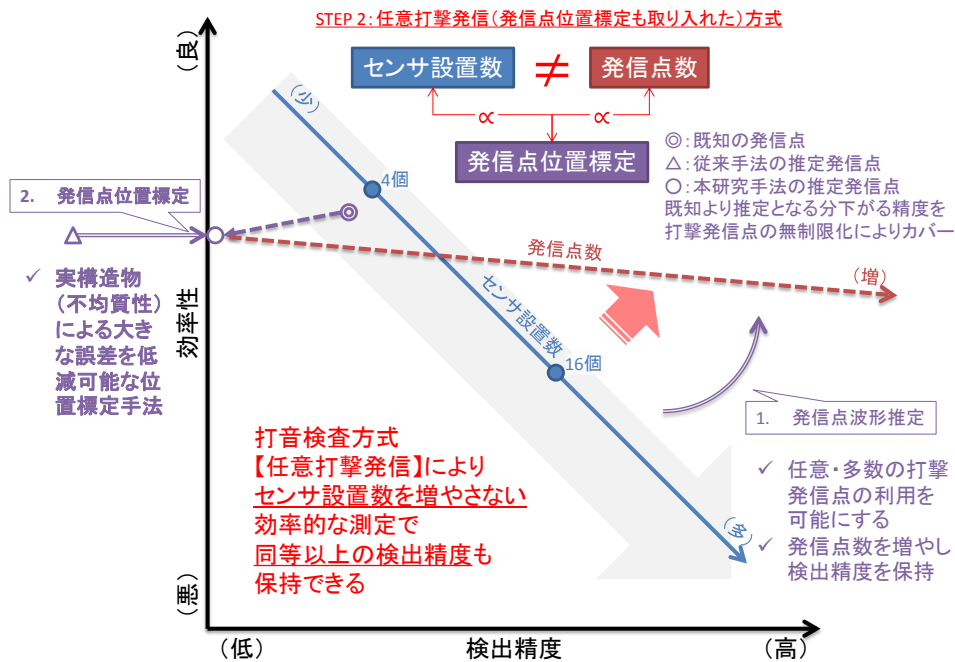


図 6.5-8 打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法における検出精度と効率性の構図

6.6 走査線密度に応じた要素分割モデルの設計

打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法により、センサ設置数を減らすことで効率性を向上させつつ、発信点数を簡便に増やすことで検出精度も同等以上となった。発信点数の増加にともない、対象範囲を網羅する走査線も増加したため、要素分割モデルにおける要素数をより細密に設計できたことも、検出精度の向上に大きく影響している。

しかし、いくら細密化した要素分割モデルを設計しても、走査線が横切らない要素が多く存在することになると細密化した意味が無く、むしろ解析における自由度が増加し、解析時間の増加や異常所見（アーチファクト）にもつながりかねない。したがって、弾性波トモグラフィ手法では、測定条件に対し最適な要素分割モデルを設計することが重要であることは言うまでもないが、現状は経験的に設計されることが多い。そこで本節では、弾性波の発信点位置および受信点位置を基に、対象範囲に存在する走査線の密度に応じた要素分割モデルの設計手法を提案する。

6.6.1 Delaunay 三角形分割を適用した要素分割手法

要素分割手法の処理フローを図 6.6-1 に示す。本研究における走査線の密度は、一つの要素上を通過する走査線の本数と定義し、走査線の本数および要素の面積にはそれぞれしきい値（ N_{max} , S_{max} ）を与える。初めに発信座標および受信座標に基づき Delaunay 三角形分割¹⁹⁾を行う。作成された各要素 i の面積（ S_i ）および各要素を通過する走査線の本数（ N_i ）を求め、それぞれしきい値に対し判定を行う。ともにしきい値を超えている場合は、さらに細かな分割が可能と判断し、該当する要素の重心に新たに座標を追加し、追加座標を含めて再度 Delaunay 三角形分割を行う。この操作を繰り返すことにより、全要素における走査線密度のばらつきを低減しつつ、要素分割を細密にすることができる。

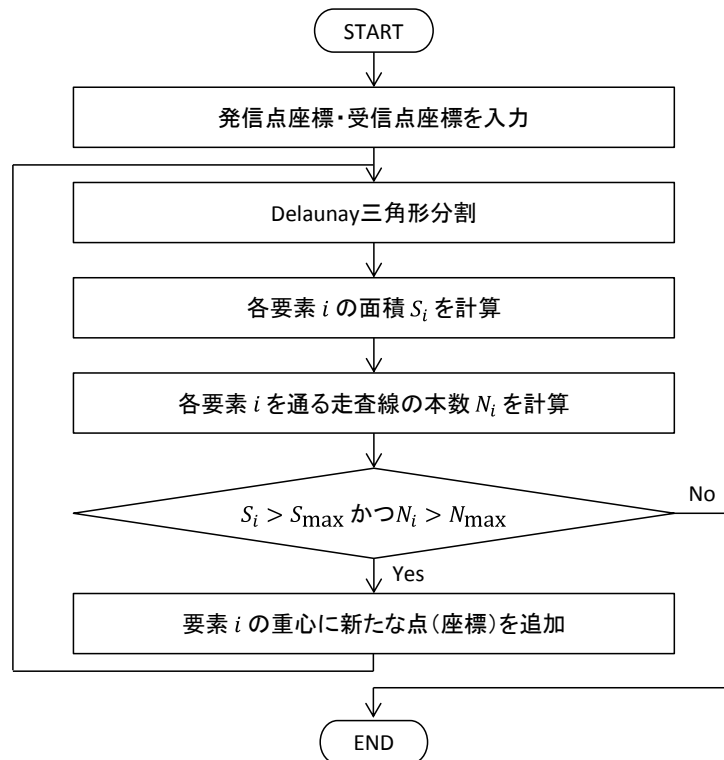


図 6. 6-1 要素分割モデル設計フロー

6. 6. 2 異なる要素分割によるトモグラフィ解析結果の比較

(1) 試験概要

異なる要素分割によるトモグラフィ解析結果を比較するために試験体による検証を行った。写真 6. 6-1 に計測対象とした RC 梁部材を示す。当該部材は連続炭素繊維補強筋と吹付けモルタルで側面に補強を行い、破壊試験を行った RC 梁である。写真に示す計測領域 (0.900 m×0.450 m) にはひび割れやモルタルの剥離が目視および打音検査により確認できる。この領域に計 15 個の共振型 AE センサ (R6, 日本フィジカルアコースティクス社製, 共振周波数 60 kHz) を配置した (図 6. 6-2, P1~15)。各センサの近傍においてペンシル芯を圧折することにより弾性波を励起させ、全ての AE センサで波形を収録した。発信点近傍の波形 (発信波形) とその他の波形 (受信波形) から到達時刻を読み取り、その差分を走査線間の伝播時間として解析を行った。到達時刻は AIC (赤池情報量規準)²⁰⁾を用い自動的に検出した。

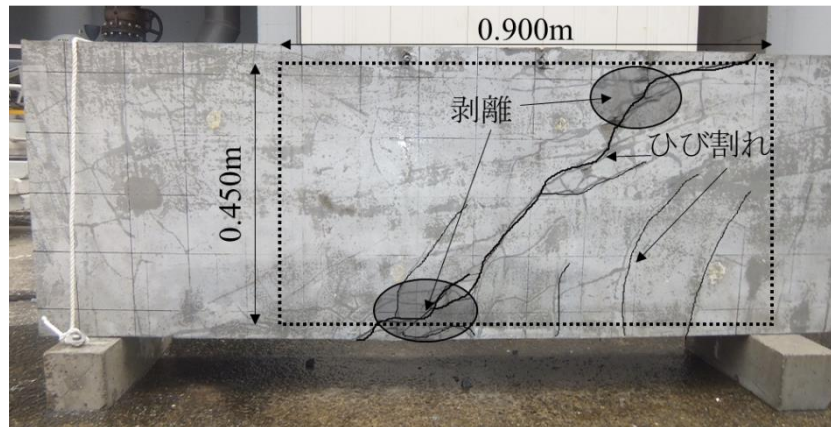


写真 6. 6-1 計測対象部材 (RC 梁部材)

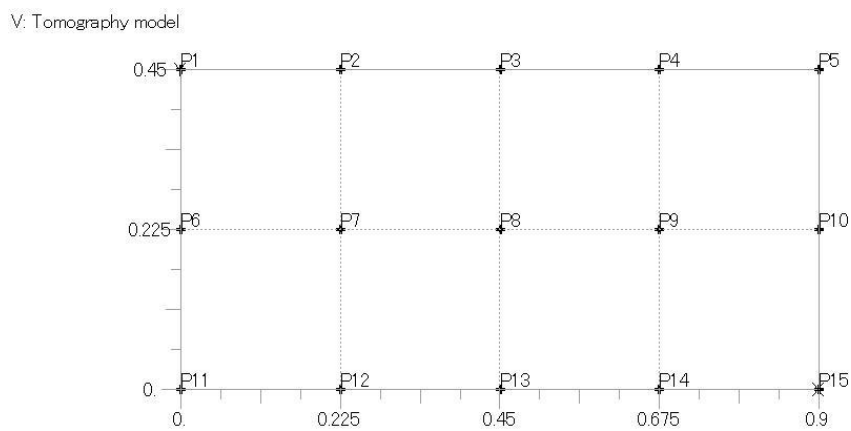


図 6. 6-2 センサ配置 P1~P15 (単位 : m)

(2) 要素分割仕様およびトモグラフィ解析結果と考察

要素分割の仕様 (要素数) を表 6. 6-1 に示す. 要素の面積のしきい値 S_{max} は, センサ間隔の 1/2 長を 1 辺とする直角二等辺三角形の面積を基準値とする割合とともに示している. また, 走査線本数のしきい値 N_{max} は, 1 つの発信点における走査線本数が全部 (往復) で 28 本であり, これを基準値とした. 本手法によれば, 基準面積であれば走査線本数に係わらず要素数は一定であり, 走査線本数のしきい値を 28 本とした場合, 要素の面積は基準面積の 1/4 相当が最小分割サイズとなる. 全 7 仕様の解析結果の内, 最も粗い要素分割となる仕様①および最も細密な要素分割となる仕様⑦の解析モデル, および, 弾性波トモグラフィ解析結果をそれぞれ図 6. 6-3, および, 図 6. 6-4 に示す. 解析結果にはひび割れスケッチも合わせて示す.

表 6. 6-1 要素分割仕様 (要素数)

		要素面積のしきい値 S_{max} [m ²] (割合)			
		0.0253 (1)	0.0063 (1/4)	0.0028 (1/9)	0.0016 (1/16)
走査線本数の しきい値 N_{max} [本]	28	① 48	② 56	-	-
	21	48	③ 88	④ 96	-
	14	48	⑤ 108	⑥ 152	⑦ 168

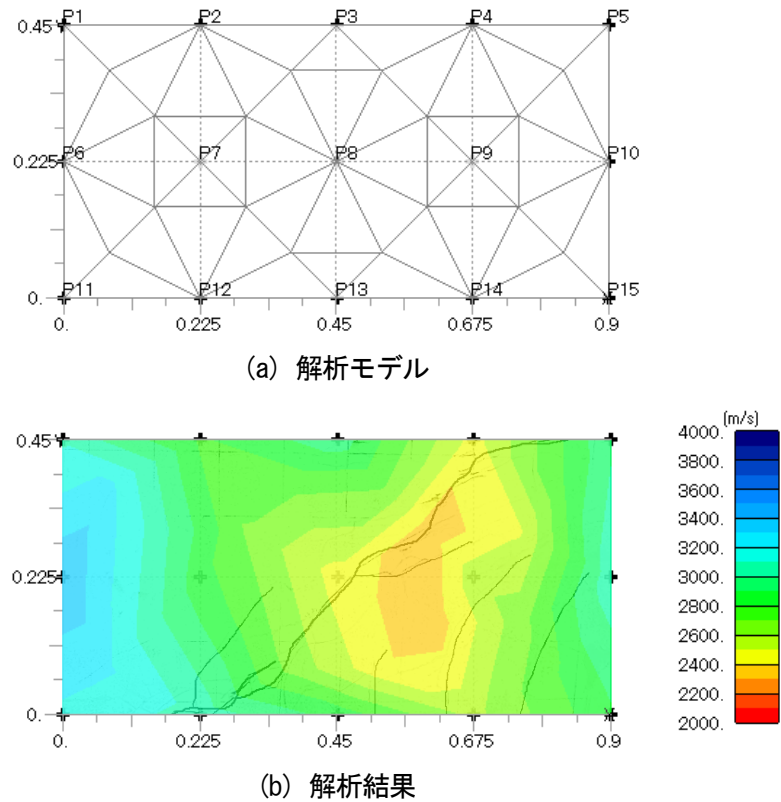


図 6. 6-3 要素分割仕様①の解析モデルと解析結果

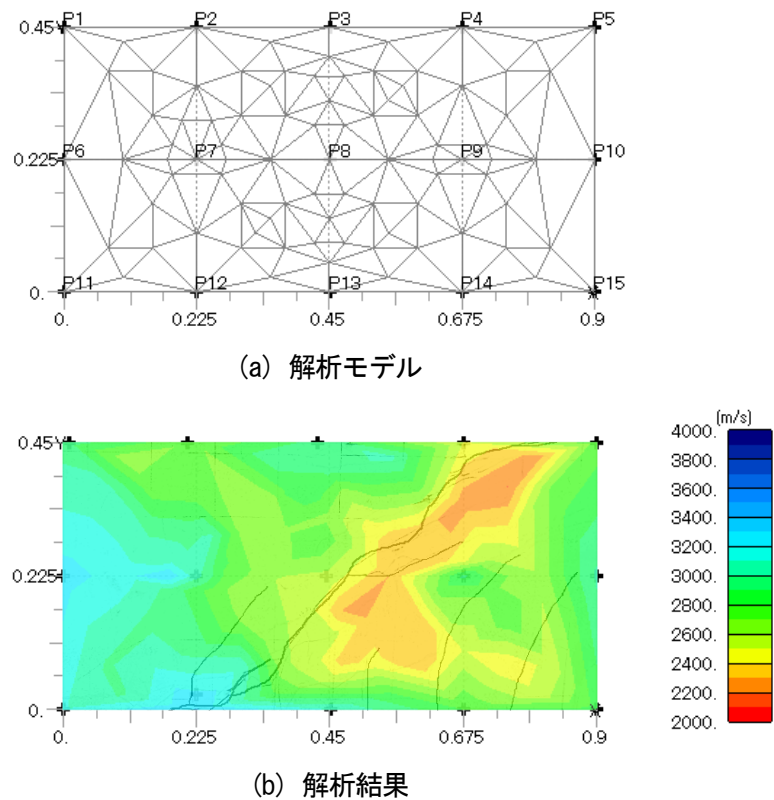


図 6. 6-4 要素分割仕様⑦解析モデルと解析結果

仕様①、⑦ともに、左下から右上にかけて確認される大きなせん断ひび割れに沿って速度低下領域が確認できるものの、要素数が少ない仕様①では、解析結果である伝播速度の分布図のみで斜めに伸びる損傷と推定することは難しい。それに対し、要素数が仕様①の約4倍である仕様⑦では、伝播速度がより細分化された分布図となり、速度低下領域が斜め損傷に近くなり損傷検出精度の高い解析結果が得られた。

解析精度の向上においては、要素の細分化は効果がある。ただし、単純に要素を細分化しただけでは、要素を通る走査線の密度のばらつきが生じ、結果として解析精度が低下する場合がある。本手法により、走査線密度のばらつきを低減しながら、要素を細分化することが可能であり、要素の細分化に合わせて解析精度も向上できることが示された。

ここで、本設計手法においては、解析精度の観点において最適な走査線密度のしきい値、および、要素面積のしきい値があると考えられる。本研究で提案した手法では、それぞれのしきい値の設定に普遍性が無く、標準化しにくいという課題がある。弾性波トモグラフィ手法の標準化を進めるために、普遍的な要素分割モデルの設計は必要不可欠であることから、要素を決定する最適なしきい値の算出方法については、さらに検討を進める必要がある。

6.7 まとめ

本章では、「計測の効率化」の課題を検討した。この課題に対しては、打音検査技術と発信波形推定手法を組み合わせることにより、配置センサ数を大幅に減らしても打音箇所を増加させることで、従来方法と同等以上の評価を可能とする打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法を提案した。打音箇所の増加はセンサの配置に比べはるかに効率的であり、調査時間の短縮を含む計測の大幅な効率化が達成された。本手法の有効性および効果を現場実験結果に基づき実証した。本章における結論を以下に示す。

- (1) 距離減衰モデルによる回帰分析により、打撃発信点の振幅の推定と最小位相推移関数による打撃発信点波形の推定を提案し、打撃発信点にセンサを設置することなく、発信波形の推定を可能とした。
- (2) 打撃発信点位置標定と表面伝播初動速度分布を同時推定するアルゴリズムを提案し、打撃発信点位置標定手法に活用したことで、任意・多数の打撃発信点を利用すること（打音検査方式）を可能にした。また、シミュレーションおよび模擬欠陥試験体により検証し、位置標定手法の有効性を示した。
- (3) 弾性波トモグラフィ手法において効果的な要素分割モデルの設計手法について検討を行い、走査線密度のばらつきを低減しながら要素を細分化する方法を提案した。複数の要素分割モデルにより試験体を用いたトモグラフィ解析を行い、解析精度が向上することを明らかにし、本手法の有効性を示した。
- (4) 打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法は、打音検査のような多数かつ任意位置の打撃信号の利用により、効率的（準備・計測時間は従来の1/4）な計測で検出精度も同等以上となり、実務性に優れていることを現場検証により明らかにした。

以上により、一面配置型弾性波トモグラフィ手法において実用上の課題であった効率性を、精度を確保しつつ解決する、打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法を実現した。この手法に対し、センサの無線化(MEMSセンサの活用)による設置の簡略化・常時設置を可能にし、自然に発生する波動（常時微動、振動、AE など）の利用、または遠隔からの発信手段や無人発信機構（フィールドロボティクス）に関する研究を推進す

ることで、オンデマンド検査手法やモニタリング手法として、より一層の効率的な健全性評価が可能になると考えられる。

第6章の参考文献

- 1) 桃木昌平, 塩谷智基, 小林義和, 水谷麻紀子: 打音検査を利用する弾性波トモグラフィ計測技術の開発, コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集, 第14巻, pp. 331-336, 2014.
- 2) 佐藤忠信, 土岐憲三, 森口康弘: 地震動に含まれる位相特性のモデル化, 京都大学防災研究所年報, 第32号, B-2, pp. 1-10, 1989.
- 3) 山崎芳男: 音響信号の時間周波数分析, 日本音響学会誌, 第53巻, 第2号, pp. 147-153, 1997.
- 4) 土木研究所先端技術チーム: 道路工事に係る騒音予測技術の向上に関する研究, 平成22年度土木研究所成果報告書, 2010.
- 5) A.パポリス: 工学のための応用フーリエ積分, オーム社, pp. 251-267, 1967.
- 6) 白井克宏, 大町達夫: 地震動のフーリエ振幅と位相の関連性について, 土木学会地震工学論文集, Vol. 28, pp. 1-6, 2005.
- 7) Papoulis, A.: Fourier integral and its applications, pp. 192-209, pp. 213-217, McGraw-Hill, 1962.
- 8) 石田毅: 岩盤破壊音の科学, 近未来社, pp. 80-86, 1999.
- 9) 湯山茂徳, 李正旺, 山田實, 林高弘: 配管における AE 源位置標定精度の定量的評価と実構造物への適用, 第16回 AE 総合コンファレンス論文集, pp. 139-144, 2007.
- 10) 大野健太郎, 宇治公隆, 國府勝郎, 清水和久: AE 法による薄肉鉄筋コンクリート部材の破壊進行過程の考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 2, pp. 637-642, 2010.
- 11) 川崎拓, 中村英之: 複合材料の AE 適用技術の開発, IIC REVIEW, No. 45, pp. 20-25, 2011.
- 12) 山口楠雄: 多チャンネル AE 標定装置の開発, 生産研究, 27巻, 3号, pp. 124-126, 1975.
- 13) 水谷義弘: AE を用いた極低温用 FRP タンクの音源位置標定法の開発, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, 2004.
- 14) 中西康博, 塩谷智基, 羅休, 羽矢洋, 稲葉智明: AE 法による橋梁基礎の損傷調査, 既設構造物の耐震補強に関するシンポジウム論文集, pp. 31-38, 2002.
- 15) 桃木昌平, 小林義和, 塩谷智基: インフラアセットモニタリングのための AE トモグラフィの開発, ～その1 アルゴリズム構築～, 第19回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp. 57-60, 2013.
- 16) 大澤智, 塩谷智基, 桃木昌平, 小林義和: インフラアセットモニタリングのための AE トモグラフィの開発, ～その2 交通荷重 AE の適用～, 第19回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp. 61-64, 2013.
- 17) 塩谷智基, 奥出信博, 桃木昌平, 小林義和: 繊維補強コンクリートの曲げ試験における AE トモグラフィの解析, 第19回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp. 65-68, 2013.
- 18) Sassa, K., Ashida, Y., Kozawa, T. and Yamada, M.: Improvement in the Accuracy of Seismic Tomography by use of

an Effective Ray-Tracing Algorithm, MIJ/IMM Joint Symposium Volume Papers, pp. 129-136, 1989.

19) 谷口健男: FEM のための要素自動分割 デローニー三角分割法の利用, 森北出版株式会社, 1992.

20) Akaike, H.: Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory, Petrov, B. N., and Caski, F. (eds.), Akademiai Kiado, Budapest, pp. 267-281, 1973.

第7章 結論と今後の課題

7.1 結論

本研究では、コンクリート構造物の健全性評価のための弾性波トモグラフィ手法の実用化を目的に、課題の解決を新しいアルゴリズムや理論の提案と室内および現場実験、数値解析などによる検証から実施した。本研究の結論を以下に示す。

第1章では、コンクリート構造物の健全性評価が要求されている社会的背景および技術的背景を述べるとともに、健全性評価における非破壊検査法の有効性を述べた。また、コンクリート構造物を対象とした非破壊検査法の現状を整理し、コンクリート構造物の非破壊検査法における弾性波法の有用性を述べるとともに、更なる高精度化を達成可能な弾性波トモグラフィ手法の優位性を述べた。同時に、当該手法の実用化のために解決すべき課題を明らかにし、本研究の目的を示した。

第2章では、トモグラフィの概要を示した後に、トモグラフィ手法の歴史や様々な分野への適用に関する既往の研究について述べた。さらに、弾性波トモグラフィ手法の概要、地盤工学分野への適用に関する既往の研究、ならびに、コンクリート構造物の健全性評価への適用に関する既往の研究について述べた。さらに、弾性波トモグラフィをコンクリート構造物健全性評価に適用する場合に解決すべき課題およびその解決方法について示した。第2章のまとめを以下に示す。

① 実構造物への適用（3次元空間への拡張）

【課題】

弾性波トモグラフィ手法では、伝播経路の追跡は波線追跡法を用いるが、現状の波線追跡法の対象は2次元平面で、センサは正方形要素で分割された節点上に配置しなければならないという制約がある。様々な形状を持つコンクリート構造物の健全性を高精度に評価するためには、任意の位置にセンサを配置することを可能とするとともに、対象を2次元平面から3次元空間へ拡張をすることが必要であった。

【解決方法】

実構造物への適用の課題に対しては、有限要素法を応用し、任意の3次元形状に対応した非制限波線追跡法を提案した。さらに提案手法を実構造物に適用し妥当性を検証した。

② 健全性の評価精度の向上（新たな指標の導入）

【課題】

現状の弾性波トモグラフィ手法では、健全性の評価指標に弾性波の伝播速度を使用している。コンクリートの欠陥部（ひび割れや空洞など）が比較的大きい場合には、弾性波は欠陥部を避けて伝播するため、伝播経路は走査線長に比べて長くなり、弾性波の伝播速度が低下する。一方、欠陥部が微細な場合、伝播経路は走査線長とほぼ等しくなり、伝播速度の低下という指標では欠陥の検出が困難となった。そのため、微細な欠陥を検出対象とするために、弾性波の伝播速度に代わる欠陥に敏感な指標の提案が要求された。

【解決方法】

健全性の評価精度の向上の課題に対しては、弾性波が欠陥部を通過する際にエネルギー損失が生じること

に着目し、評価指標に弾性波の振幅・エネルギーを用いた減衰トモグラフィ手法を提案した。さらに提案手法を実構造物に適用し妥当性を検証した。

③ 適用範囲の拡大（センサ配置が片側表面に制限される構造物への適用）

【課題】

現状の弾性波トモグラフィ手法は打撃などの外力により生じた実体波の透過弾性波を利用することから、計測対象のコンクリート構造物を挟み込むようにセンサを配置することが必要とされた。トンネル覆工コンクリートや地中構造物などのようにセンサ配置が片側表面に制限されるコンクリート構造物には本手法の適用が不可能となるため、片側表面から検査可能な技術の手法が要求された。

【解決方法】

適用範囲の拡大の課題に対しては、深さ方向の情報を有する表面波を健全性の評価指標に用いることにより、片側表面から健全性を評価できる一面配置型弾性波トモグラフィ手法を提案した。さらに提案手法を模擬欠陥試験体に適用し妥当性を検証した。

④ 計測の効率化

【課題】

コンクリート構造物の健全性評価を実用化する上では、評価精度と分解能の向上が求められる。弾性波トモグラフィ手法において評価精度と分解能を向上させるためには、センサ設置数を増やす必要があるが、センサ設置数と調査時間との間にはトレードオフの関係があった。しかし、道路や鉄道など供用中の構造物の場合、コスト最小化の観点からセンサ設置を含む調査時間に制約があり、その短縮が求められた。このため、評価精度と分解能を低下させることなく、調査時間を短縮する必要があった。

【解決方法】

計測の効率化の課題に対しては、従来から非破壊検査法として使用されている打音検査を弾性波探査法と併用し、センサ数を増やすことなく解析精度の分解能を確保する打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法を提案した。さらに提案手法を実構造物に適用し妥当性を検証した。

第3章では、「①実構造物への適用」の課題を解決するため、現状の弾性波トモグラフィ手法では、適用対象断面が2次元断面に限定されていたが、有限要素法を応用した任意の3次元形状に対応可能な波線追跡法を提案した。同時に、実構造物への適用結果から提案手法の有効性を実証した。第3章のまとめを以下に示す。

- (1) 要素分割モデルとして正方形の2次元平面モデルに限定されていた従来の波線追跡法に対して、三角形、四面体および六面体要素にも対応でき3次元空間モデルに拡張可能な非制限波線追跡法を提案した。
- (2) 提案した非制限波線追跡法を弾性波トモグラフィ手法に用いることにより、センサ位置やモデル化に制約されない、3次元形状をもつ実構造物に対しても適用可能な弾性波トモグラフィ手法を開発した。
- (3) 弾性波トモグラフィ手法による解析結果に基づき、複合材料の均質化モデルを用いた数値解析より、ヤング係数という指標を用いて構造物の補修前後の健全性を定量的に評価した。

- (4) 開発した弾性波トモグラフィ手法を用いた現場検証によって、大規模なコンクリート構造物の損傷規模や分布の視覚的把握、さらには補修による効果の検証を、従来の2次元弾性波トモグラフィ手法より全体的かつ効率的に行うことが可能であることを示した。

第4章では、「②健全性の評価精度の向上」の課題を解決するために、ひび割れや空洞といった欠陥部が微細な場合にも健全性を高精度・高感度に評価できる指標として、従来使用されてきた弾性波伝播速度に代わり、弾性波の振幅の減衰特性に周波数依存性があることを考慮したスペクトル減衰率を用いる評価方法を考案し、減衰トモグラフィ手法として提案した。また、提案手法の有効性を実構造物への適用結果から実証した。第4章のまとめを以下に示す。

- (1) 構造物内部の損傷度が大きくなるに従い、伝播速度に比べて振幅の減衰比が極めて顕著に低下することが基礎試験によりわかった。損傷に対してより感度の高いパラメータであるため、より微細な欠陥を検出できる可能性があることを示した。
- (2) 周波数依存性を考慮できるスペクトル減衰率を弾性波トモグラフィ手法に実装した減衰トモグラフィ手法を提案した。振幅の減衰特性によって構造物内部の損傷度を高感度に評価できる可能性を示した。
- (3) 減衰トモグラフィ手法をひび割れが発生した現場のコンクリート構造物に適用し、速度トモグラフィ手法に比べ、さらに高感度な評価が可能であることを示し、同手法の有効性を実証した。
- (4) PC構造物の躯体であるコンクリート構造体の異常の検出と、シース内の充填率の同時評価を行うために、PC構造物に対して走時トモグラフィ手法と減衰トモグラフィ手法を同時に用いる手法を提案した。数値解析シミュレーション検証により、高感度な減衰トモグラフィ手法の充填率評価への有効性を示した。また、伝播速度とスペクトル減衰率の統合指標による可視化手法を適用することで、合理的に健全性を評価できる可能性も示した。

第5章では、「③適用範囲の拡大」の課題を解決するために、トンネル覆工コンクリートや擁壁のように従来適用が困難であった片側表面にしかセンサが配置できないコンクリート構造物にも適用可能なように、深さ方向の情報を有する表面波に着目し、表面波の位相速度を評価指標とした一面配置型弾性波トモグラフィ手法を提案した。また、実構造物への適用結果から本手法の有効性を実証した。第5章のまとめを以下に示す。

- (1) 表面付近を楕円状に振動しながら伝搬する表面波（レイリー波）をトモグラフィに適用することで、その振動範囲内にひび割れや空洞などの異常部が存在する場合、それによる反射または散乱により生じる乱れを利用し、構造物内部の状態を評価できることを示した。
- (2) 一面配置型弾性波トモグラフィ手法は、片側表面へセンサを配置し、各種鋼球型のハンマにより各センサの近傍に打撃を加えることで弾性波を生成させ、走査線間で計測された表面波位相速度（表面波の抽出波形から得られる卓越周波数より算出）を基に解析を行う。鋼球径を変えることで振動範囲（測定範囲）を調整することが可能であり、片側表面にアプローチが制限される構造物においても広域的に内部の健全性を評価できることを示した。

- (3) 模擬欠陥試験体において、表面波の位相速度を用いた本手法によって片側背面だけのセンサ配置で構造物内部の健全性評価が可能であることを実証した。同時に、欠陥の検出可能深度は生成される表面波の波長に依存すること、確実に欠陥を検出するためには、欠陥の深度と同程度以上の波長を有する表面波を生成させる必要があることを明らかにした。
- (4) 本手法を用いることで、従来の弾性波トモグラフィ手法では不可能であったトンネル覆工コンクリートや橋梁床版、擁壁のように背面側へのアプローチが不可能な構造物に対しても、健全性評価を可能とした。
- (5) 本手法が、広域的にスクリーニング調査を行い、多重反射法やその他の詳細検査手法を要する箇所を絞り込むのに有効であることを示した。
- (6) 断面修復工法や充填補修工などリニューアル工事における施工品質の確認に適用し、トモグラフィ解析から得られる表面波位相速度画像を活用することで、破壊を伴う検査を最小限に留め、かつ信頼度の高い品質確認を行うことができることを示した。

第6章では、「④計測の効率化」の課題を解決するために、打音検査技術と発信波形推定手法を組み合わせることにより、配置センサ数を大幅に減らしても打音箇所を増加させることで、従来方式と同等以上の評価を可能とする打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法を提案した。打音箇所の増加はセンサの配置に比べはるかに効率的であり、調査時間の短縮を含む計測の大幅な効率化が達成された。本手法の有効性および効果を現場実験結果に基づき検証した。第6章のまとめを以下に示す。

- (1) 距離減衰モデルによる回帰分析により、打撃発信点の振幅の推定と最小位相推移関数による打撃発信点波形の推定を提案し、打撃発信点にセンサを設置することなく、発信波形の推定を可能とした。
- (2) 打撃発信点位置標定と表面伝播初動速度構造を同時推定するアルゴリズムを提案し、打撃発信点位置標定手法に活用したことで、任意・多数の打撃発信点を利用すること（打音検査方式）を可能にした。また、シミュレーションおよび模擬欠陥試験体により検証し、位置評定手法の有効性を示した。
- (3) 弾性波トモグラフィ法において効果的な要素分割モデルの設計手法について検討を行い、走査線密度のばらつきを低減しながら要素を細分化する方法を提案した。複数の要素分割モデルにより試験体を用いたトモグラフィ解析を行い、解析精度が向上することを明らかにし、本手法の有効性を示した。
- (4) 打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法は、打音検査のような多数かつ任意位置の打撃信号の利用により、効率的（準備・計測時間は従来の1/4）な計測で検出精度も同等以上となり、実務性に優れていることを現場検証により明らかにした。

以上の検討を通じ、社会の要請である社会資本の有効利用、継続利用、延命化に寄与するコンクリート構造物の健全性評価技術としての、弾性波トモグラフィ手法の実用化をはばむ

- ① 実構造物への適用（3次元空間への拡張）の課題
- ② 健全性の評価精度の向上（新たな指標の導入）の課題
- ③ 適用範囲の拡大（センサ配置が片側表面に制限される構造物への適用）の課題

④ 計測の効率化の課題

に対する解決策を提示した（図 7.1-1）。

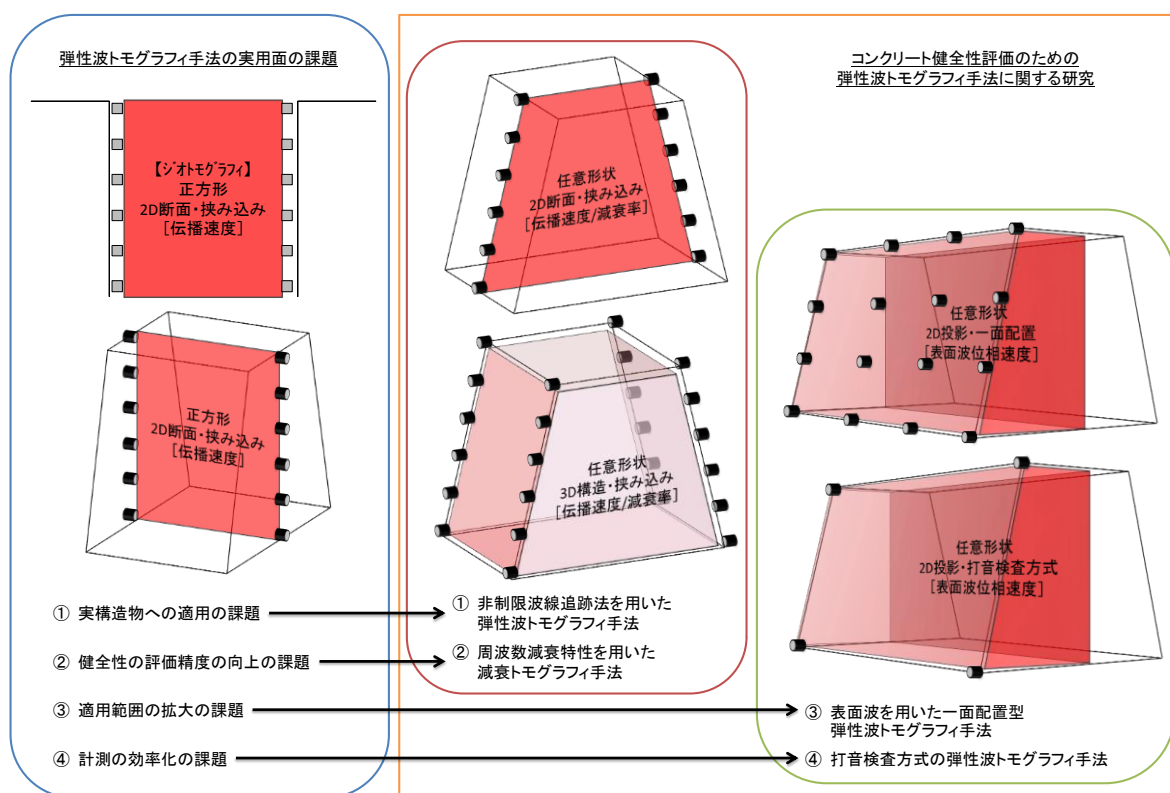


図 7.1-1 弾性波トモグラフィ実用化のために解決すべき課題と成果

7.2 コンクリート構造物のシナリオデザインにおける弾性波トモグラフィ手法の活用

コンクリート構造物は市民社会に必要不可欠であることは言うまでもなく、重要な役を演じている。そのコンクリート構造物に対し、単に「今こうだからこうしようか」ではなく、コンクリート構造物が「どのような形で生まれ、（本来）どのような生涯を送るべきか、どのように育ち、市民に愛され、大切にされ、管理されるべきか」というシナリオをデザインすることが、これからのコンクリート構造物に関わる技術者に求められている¹⁾。そして、新設・既設に関わらず、コンクリート構造物が主役としてシナリオを演じ切るための維持管理を適切に実施するためには、適切な診断を行うことが不可欠である。診断は、図 7.2-1 に示すように、点検、劣化機構の推定、予測、性能の評価、対策の要否判定によって構成され、適切な診断を行う上で、点検の良否は極めて重要となる²⁾。

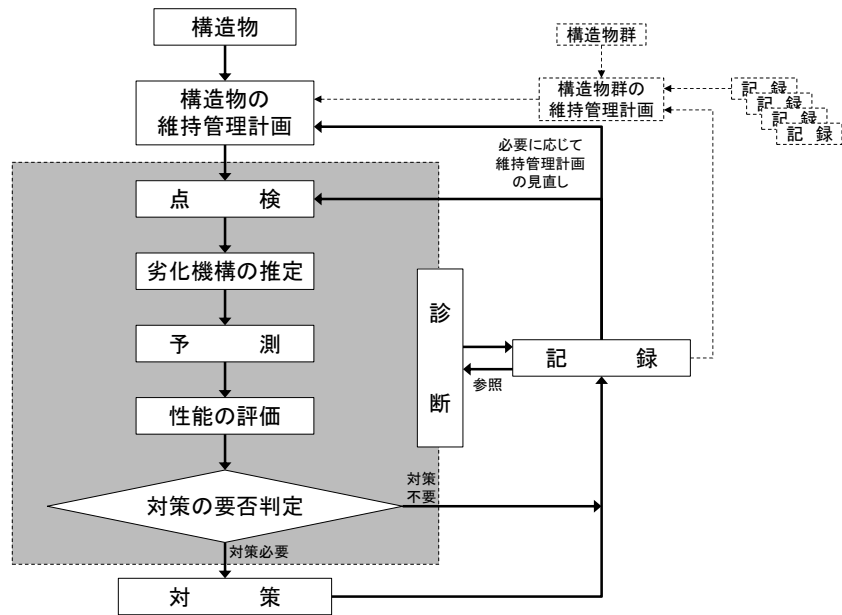


図 7.2-1 構造物の維持管理の手順²⁾

点検は、初期点検、日常点検ならびに定期点検、臨時点検、および緊急点検に区別される。初期点検は、維持管理開始時の構造物の状態を把握するために行われる。日常点検ならびに定期点検は、点検時の構造物の状態の把握および供用による構造物の状態の変化を把握するために行われる。臨時点検は、構造物が地震や台風、車両や船舶の衝突による外力の作用などを受けた場合やその可能性がある場合に、対象となる構造物の状態を把握するために行われる。緊急点検は、変状などが構造物に発生した場合に、その構造物と類似の構造物や類似の環境にある構造物、または、同時期あるいは同一形式で建設された構造物に対しても状態を把握するために行われる。これらの点検を行い、それぞれで得られた情報を比較検討することで、図 7.2-2 に示すように、供用開始からの構造物の状態の変化、点検時以降における構造物の状態変化の予測などが行え、戦略的な維持管理を行うことが可能となる³⁾。

本研究成果である弾性波トモグラフィ手法は、第 3 章から第 6 章までに示した全ての手法に共通する利点として、①構造物の状態の把握が、構造物全体あるいは広範において可能であり、構造物の状態の局所的なバラつきも把握できること、②画像として記録に残り、かつ、非破壊検査手法であるため、同範囲での同手法による繰り返しの適用が可能であり、構造物の状態の変化の把握にも有用であること、そして、③単純な色の分布や変化で構造物の状態や状態の変化が把握でき、わかりやすいことが挙げられる。そこで、本節では、コンクリート構造物にデザインされるべきシナリオにおいて重要となる点検に対し、本研究成果である弾性波トモグラフィ手法の活用について示す。

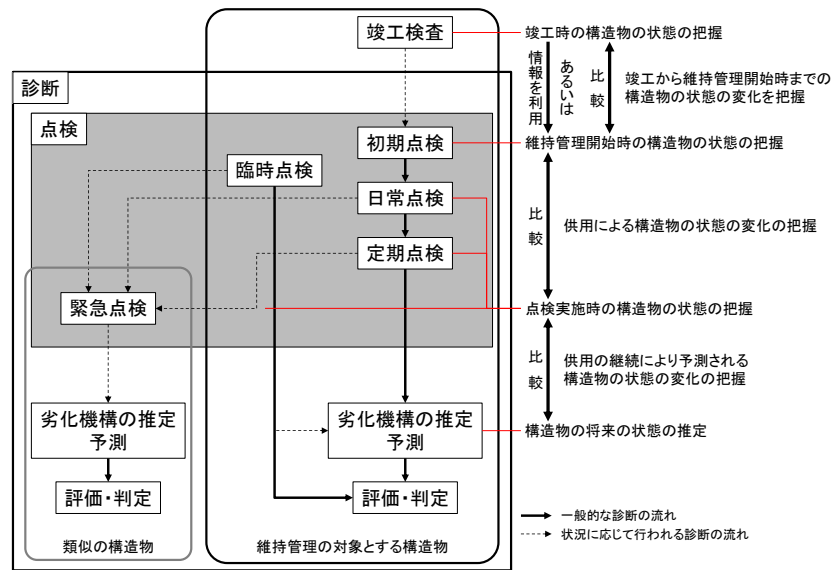


図 7.2-2 点検の種類と構造物の状態の変化に関して把握される内容³⁾

(1) 新設構造物における点検への活用

新設されるコンクリート構造物が「どのような形で生まれ、どのような生涯を送るべきか」を考えるために、まず、維持管理開始時（あるいは竣工時）の構造物の状態を、弾性波トモグラフィ手法により把握する。次に、設計時または維持管理計画策定時に決定した供用開始時の性能、および予定供用期間を保証する記録として評価結果である画像を残す。さらに、同範囲における同手法による評価結果である画像を比較することで、構造物の状態の変化を把握し、劣化機構の推定、劣化進行あるいは性能低下の予測、対策の要否判定を行う。

新設構造物における点検への弾性波トモグラフィ手法の活用案を図 7.2-3 に示す。構造物を新設する際、コンクリートの品質確認または管理のために、コンクリート打設に併せて円柱供試体を製作する。この円柱供試体に対し材齢ごとに、例えば材齢 3, 7, 14, 28 日時に圧縮強度試験を実施し、強度が所定通りに発現しているか確認する。そこで、この円柱供試体と同様に角柱供試体を別途製作し、圧縮強度試験と同じく材齢ごとに弾性波計測を実施する。新設された構造物では、特に初期（竣工検査時または初期点検時）において、何らかの劣化機構により状態が変化するということは考えにくい。つまり、状態の変化が起こる場合は施工欠陥であると考えられる。したがって、コンクリートは密実であることを前提とし、圧縮強度と弾性波評価指標（伝播速度、減衰率、位相速度）との関係を把握しデータベースとして蓄積することで、弾性波トモグラフィ手法により得られた画像において、所定の強度に相当しない弾性波評価指標を示す位置を、密実ではない施工欠陥部であると推定することができる。また、この材齢強度を対照とした弾性波評価値は、定期点検時においても劣化機構の直接的な推定は困難であるが、劣化機構による変状を示唆することは可能である。評価は、材齢 28 日時の強度に相当する弾性波評価指標を基準値として、75%以下は要確認（記録・経過観察）、50%以下は詳細調査（コア採取により確認）とする。範囲は、対象とする構造物の構造（柱・梁・壁・床）ごとに 1～3 箇所選定する。なお、選定箇所については、全体を網羅するセンサ配置で弾性波トモグラフィ手法を実施する。頻度は、定期点検時に合わせて 3-5 年に 1 回とする。

弾性波トモグラフィ手法を活用することで、局部的なバラつきに左右されることなく、構造物全体の状態

の把握が可能である。また、図 7.2-4 に示すように同一の試験体、さらには構造物の同範囲での繰り返しの適用が可能であり、構造物の状態の変化の把握も的確に実施できる。ただし、実際に活用するためには、弾性波計測に用いる角柱試験体の適切な仕様を検討する必要がある。特に、弾性波の励起周波数が実構造物と試験体で異なると、材齢強度に対する弾性波評価指標のデータベースが実構造物に対応しないと考えられる。また、実構造物の規模を考慮した励起周波数では、試験体での適切な計測が困難であることも考えられる。つまり、試験体による計測と、そのデータに基づいた実構造物への適用のために、励起周波数と計測範囲を十分に把握し、それを踏まえて適切な試験体の仕様を設計しなければならないという課題がある。

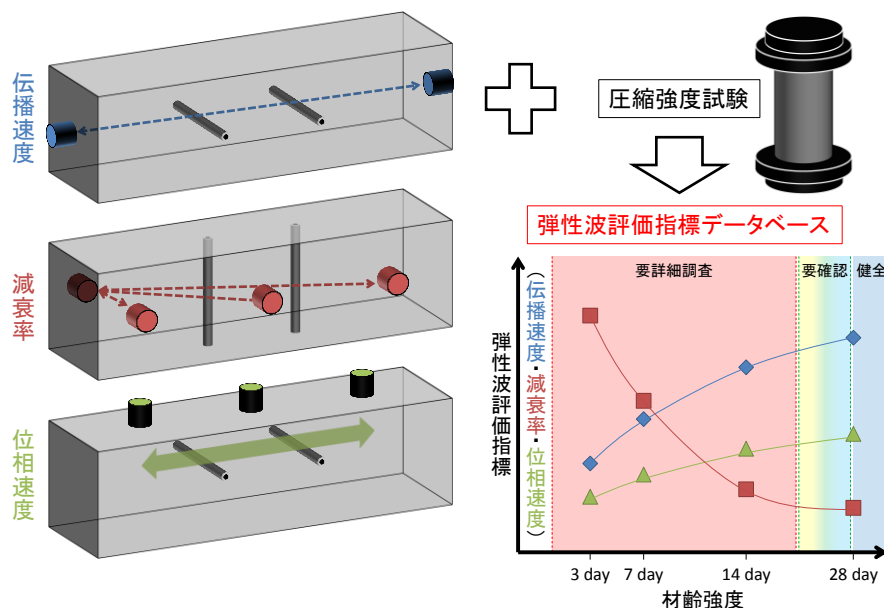


図 7.2-3 新設構造物における点検への活用品 (材齢強度に対する弾性波評価指標データベースの構築)

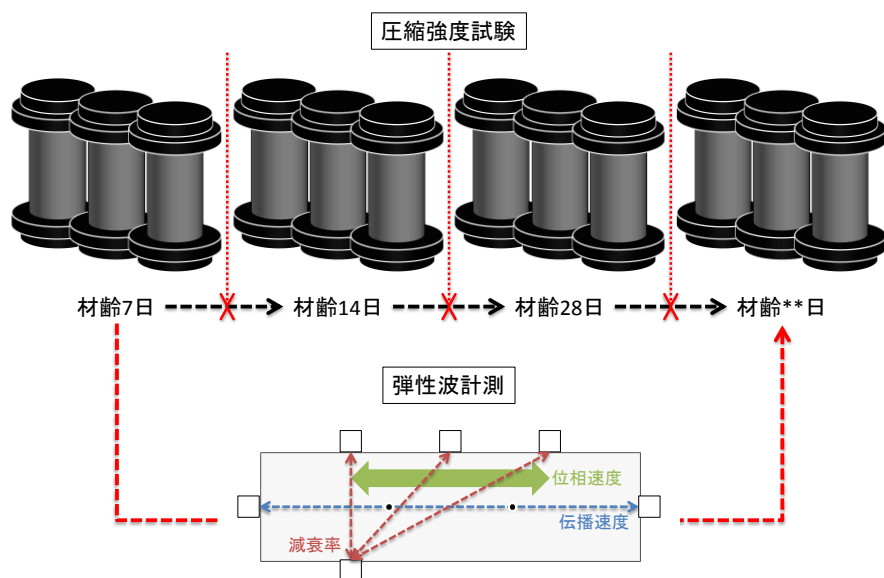


図 7.2-4 同一の試験体による弾性波計測

(2) 既設構造物における点検および対策への活用

既に建設されているコンクリート構造物が「本来どのような生涯を送るべきか」を考えるために、点検実施時の構造物の状態を、弾性波トモグラフィ手法により把握し、劣化機構の推定、劣化進行あるいは性能低下の予測、対策の要否判定を行う。また、対策として実施された補修による性能の回復や補強による性能の向上を弾性波トモグラフィ手法により確認し、それらを基に対策後の維持管理計画を策定する。

(1)と同様に弾性波トモグラフィ手法を活用することで、局所的なバラつきに左右されることなく、構造物全体の状態の把握が可能である。また、同範囲での適用が可能であり、補修や補強の効果確認を的確に行うことができる。しかし、初期情報が無い状況での既設構造物への適用や、補修・補強による性能の回復・向上を評価するためには、(1)に示した以上に詳細な評価指標と、劣化機構、または劣化進行あるいは性能低下との関連付け（定量的評価）が重要であり、より多くのデータを蓄積する必要がある。

既設構造物における点検および対策への弾性波トモグラフィ手法の活用案を図 7.2-5、図 7.2-6 に示す。

図 7.2-5 に示すように、基本的には(1)と同様に、ここでは対象と類似の試験体を準備し、劣化促進試験と並行して弾性波計測を行い、劣化の度合に対する弾性波評価指標のデータベースを構築する。しかし、弾性波の伝播挙動は物理現象であり、例えば塩害や中性化、それにとまなう鉄筋の腐食など、化学現象を直接的に反映することは困難である。そこで、劣化促進試験により現れる試験体の劣化の度合を、図 7.2-6 に示すように、弾性波の伝播挙動に対し直接的に影響する指標（例えば密度、または空隙率）で示し、それらを基に評価する。評価は(1)と同様に、材齢 28 日時の圧縮強度に相当する弾性波評価指標を基準値として、75% 以下を示す範囲においてコア採取を 3 箇所（弾性波評価指標の程度に合わせて）で実施し、実態を確認する。さらに、採取したコアにおいて密度や空隙率を測定し、弾性波評価指標データベースに蓄積する。範囲も(1)と同様に、代表とする構造を選定する。ただし、補修の対象となる範囲は、範囲全体を網羅するセンサ配置により補修前後に計測を行い、補修による改良効果の確認を行う。頻度は、供用開始後 50 年程度経過する重要構造物に対して順次実施する。

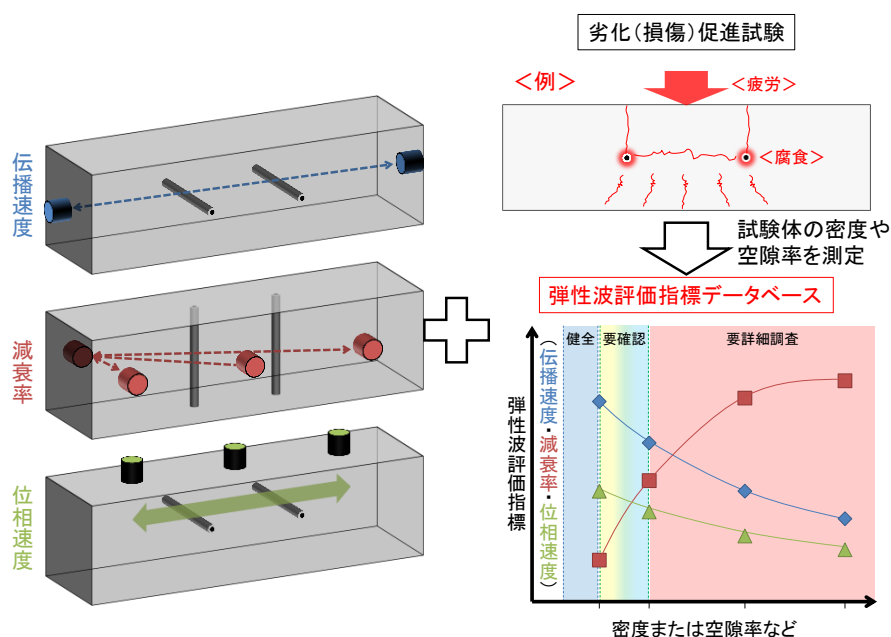


図 7.2-5 劣化促進試験と弾性波計測による弾性波評価指標データベースの構築

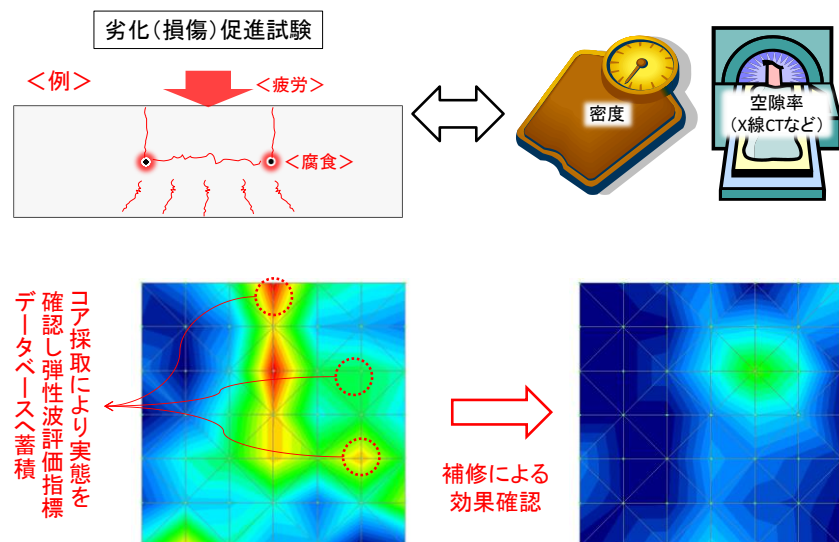


図 7.2-6 既設構造物における点検および対策への活用案

(3) 点検情報の公開と共有のための活用

新設・既設に関わらず、コンクリート構造物が「どのように育ち、市民に愛され、大切にされ、管理されるべきか」を考えるために、構造物を利用する市民が、利用する構造物の状態を随時把握できるようにする。さらには、第 6 章で示した打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法のように、点検の行為自体の簡略化により、市民も構造物の状態を把握する点検に参加できるようにする。点検情報の公開と共有のための活用案を図 7.2-7 に示す。

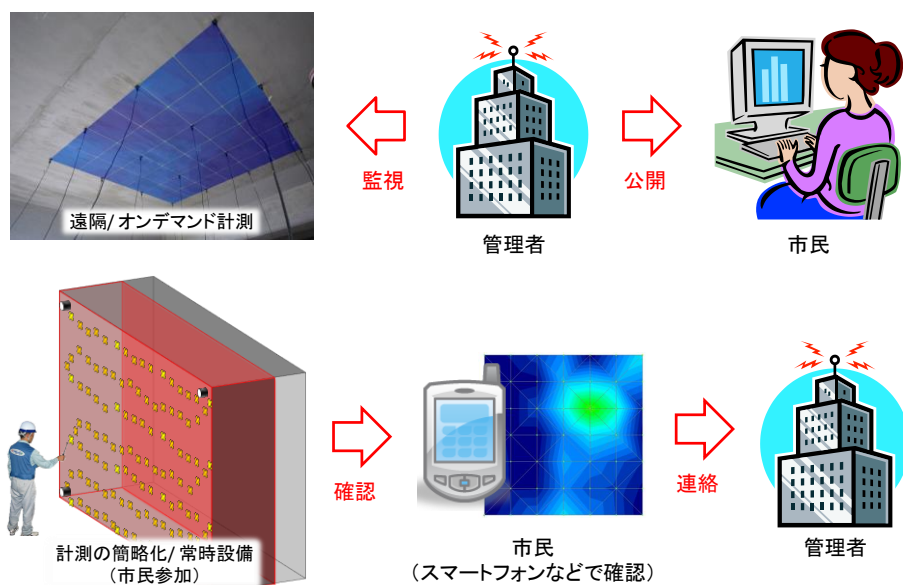


図 7.2-7 点検情報の公開と共有のための活用案

弾性波トモグラフィ手法による点検結果は、単純な色の分布や変化で把握できるわかりやすい画像で示される。それゆえ、どの色がどんな状態を表すかといった適切な注釈を添えて随時公開することで、地震や台風、車両や船舶の衝突による外力の作用などを受けた場合やその可能性がある場合にも、市民が自ら安全性

を確認して利用することができる。また、誰よりもいち早く構造物の異常に気付けるのは、近隣に住み、構造物を利用する市民である。したがって、外観だけでなく内部の異常もわかりやすい画像で示される点検に参加し、管理者に対し報告・連絡・相談できる社会を構築することで、市民のコンクリート構造物への意識を高めつつ、限られた重要構造物だけでなく、より身近な構造物の維持管理も合理的に実施できる。

これらの実現には、画像が何を表すかという適切な注釈が必須であり、(1)、(2)と同様に定量的評価へと昇華させる必要がある。また、弾性波トモグラフィ手法の更なる効率化のためには、センサの無線化により設置を簡略化し、常時設置を可能にすることや、自然に発生する波動を利用できること、または遠隔からの発信手段や無人発信機構、さらには、解析速度の向上によるリアルタイム表示を可能とすることが必要となる。

7.3 今後の課題

本研究では、現代社会の要請である戦略的な維持管理達成に応えるために、維持管理コストの最小化を実現するコンクリート構造物の健全性評価に対し命題となる広域的、効率的、効果的な非破壊検査手法となり得る弾性波トモグラフィ手法に関する研究を実施し、7.1に示す成果を得た。7.2で示したコンクリート構造物のシナリオデザインにおける弾性波トモグラフィ手法の活用や、成果の更なる発展・高度化のためには解決すべき課題が残されている。今後の課題を以下に示す。

(1) コンクリート構造物の定量的健全性評価技術としての高度化

本研究では、伝播速度を評価指標とする走時トモグラフィ手法に加え、スペクトル減衰率を評価指標とする減衰トモグラフィ手法、および表面波位相速度を評価指標とする一面配置型弾性波トモグラフィ手法を提案した。これらの評価指標は、コンクリートの強度や緻密性など、品質に関わる物理的指標への関連付けは十分ではない。第5章で示した表面波位相速度については、波長と評価範囲との整合性を高めるためにもより多くの検証が必要となる。検証データを蓄積し、対象となるコンクリート構造物の実態と合わせてデータベース化していくことにより、将来的には、弾性波トモグラフィ手法を用いた、コンクリート構造物の実態に迫る健全性評価が可能になると考えられる。

(2) 弾性波トモグラフィ手法の更なる効率化

本研究では、様々なコンクリート構造物に適用可能で、かつ任意・多数の打撃発信を最小限のセンサ設置数で利用できる打音検査方式の弾性波トモグラフィ手法を提案し、実務性を飛躍的に高めた。この手法に対し、センサの無線化(MEMSセンサの活用)による設置の簡略化・常時設置を可能にし、自然に発生する波動(常時微動、振動、AEなど)の利用、または遠隔からの発信手段や無人発信機構(フィールドロボティクス)、さらには解析速度の向上によるリアルタイム表示に関する研究を推進することで、オンデマンド検査手法やモニタリング手法として、より一層の効率的な健全性評価が可能になると考えられる。

(3) 適用の目的と結果の解釈における留意点

本研究の主題である弾性波トモグラフィ手法は、第3章に示したように広範な計測が可能である反面、より遠くまで伝播する弾性波の励起周波数は低周波であり、欠陥部の検出分解能は低くなる。つまり、大きな

規模の欠陥が想定される場合や、広範囲におよぶ終局的な劣化または損傷に対し適用することが適切である。また、第4章で用いた超音波発生器は、鋼球ハンマによる打撃と比べると、高周波の弾性波が励起されることになり、欠陥部の検出分解能は高いが、減衰の影響が大きくなるため、計測範囲は狭くなる。小さな規模の欠陥が想定される場合や、劣化や損傷の初期段階に対し適用することが有効である。このように励起周波数と計測対象の欠陥規模との関係を十分に把握した上で、当手法を目的に合わせて適用することが望ましい。この励起周波数と計測対象の欠陥規模との関係、例えば「この欠陥規模を対象とするのであれば、この周波数の励起、またはこの検出センサーを用いれば良い」というように具体的に提示するためには、本研究で実施したデータだけに留まらず、さらに多くのデータを蓄積する必要がある。

また、走時トモグラフィ手法を例とすると、最終速度断面においても、検査範囲・形状の制限により、あるいは、検査対象領域の内部にあまりに大きな速度コントラストがあることにより、そして、対象領域の境界部を通る波線を用いて解析したことにより、偽像が発生している可能性がある。このような点に十分に留意した上で、多くの検証データと解析事例の蓄積によるデータベースを参考に、解析結果に対し適切に土木工学的な解釈を行う必要がある。加えて、コンクリート構造物健全性評価のための弾性波トモグラフィ手法が広く社会に利用されるためにも、利用者への啓発活動が今後重要となる。

第7章の参考文献

- 1) 宮川豊章：シナリオデザインのすすめ，JICE REPORT, Vol. 22, pp. 1-11, 2012.
- 2) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書 [維持管理編：本編]，pp. 12-19, 2013.
- 3) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート標準示方書 [維持管理編：標準]，pp. 29-51, 2013.